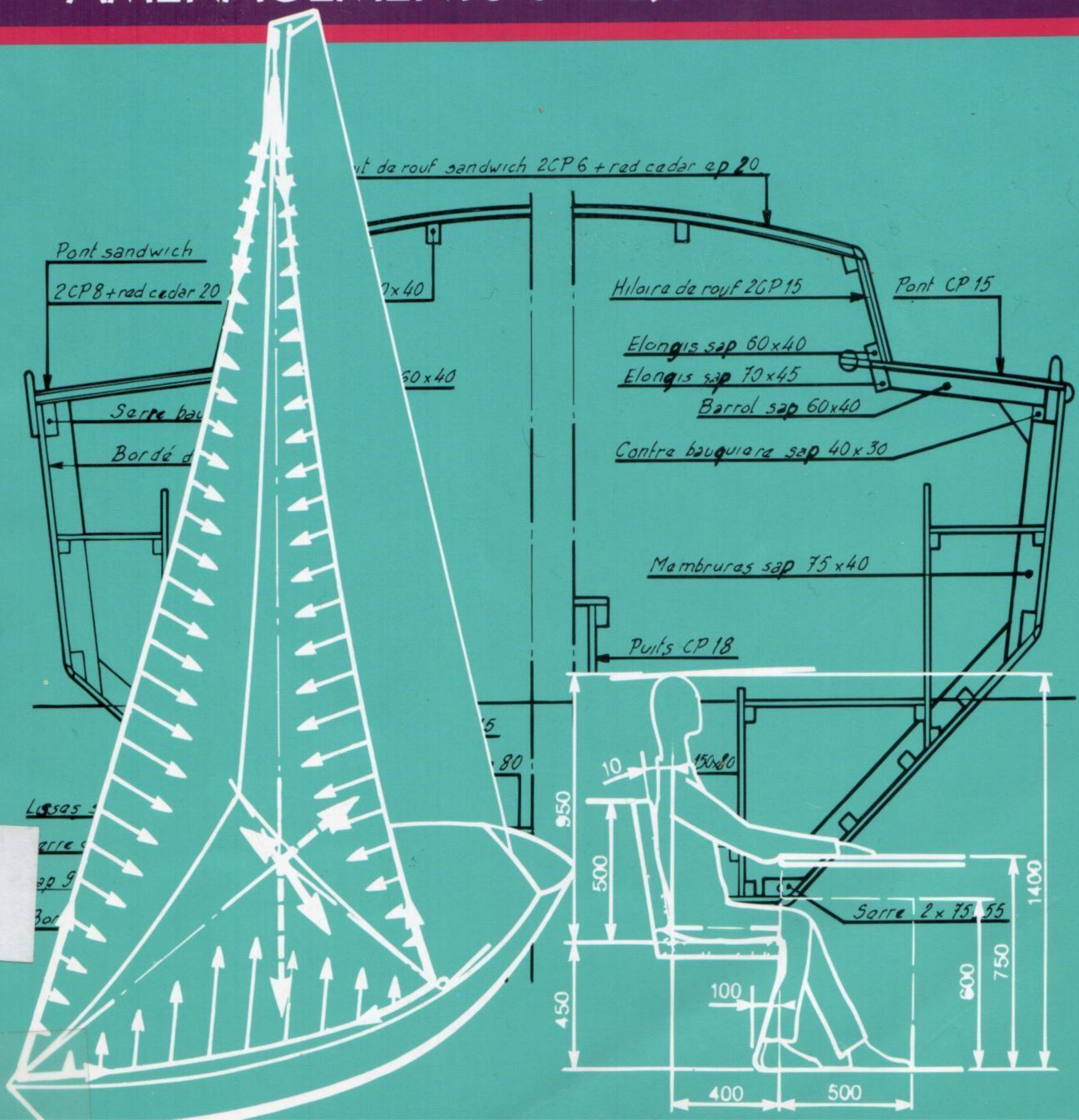
Pierre GUTELLE

ARCHITECTURE DU VOILIER

TOME 3 • CONSTRUCTION, GRÉEMENTS, AMÉNAGEMENTS & ÉQUIPEMENTS



INTRODUCTION

AVEC ce TOME III, en fait la seconde partie du TOME II de la première édition d'ARCHITECTURE DU VOILIER, on aborde la partie concrète de sa réalisation, à savoir la construction, le gréement, les aménagements et tous les équipements du voilier.

Cette partie, souvent considérée comme fastidieuse dans le processus de création, et de ce fait très souvent négligée, n'en est pas moins capitale.

D'elle, en effet, dépendront la solidité et la longévité du voilier et, par là même, sa sécurité. Dans ce domaine, ce volume intéressera non seulement l'architecte potentiel mais également le propriétaire actuel ou éventuel qui sera souvent très étonné de comparer ce qui est conseillé ici avec la réalité de son propre navire ou des unités qu'il visite dans les salons ou chez les revendeurs.

La dernière décennie a vu apparaître dans la construction de plaisance de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies de mise en œuvre, provenant de secteurs de pointe comme la construction aéronautique ou l'armement.

Ils nécessitent des connaissances, des moyens techniques et humains, une qualification et des moyens de contrôle qui sont loin d'être à la portée du constructeur courant. Il en est résulté des déceptions qui obligent à les réserver généralement à des constructions spéciales destinées à des utilisations spécifiques dans des conditions parfaitement définies et avec des risques acceptés, ceci en dehors de la construction commerciale destinée aux plaisanciers amateurs.

Il n'en reste pas moins que des progrès sont toujours possibles dès lors qu'on en accepte les contraintes. Il n'est pas certain cependant que les nouvelles dispositions réglementaires européennes assurent, sur ce plan, une meilleure sécurité pour l'acheteur. ⚓

5

LA CONSTRUCTION

Il n'est pas question dans un simple chapitre de décrire en détail tous les procédés de construction utilisés avec les divers matériaux. Chacun d'eux nécessiterait un livre à lui seul qui, la plupart du temps d'ailleurs, existe déjà. On en trouvera la bibliographie à la fin de ce chapitre.

Il n'est pas question non plus de développer la comparaison entre les divers matériaux, cela a été abordé dans le TOME 2 - CHAPITRE 4 et est fort bien traité dans l'ouvrage de J.P. AUBRY déjà cité (bibliographie CHAPITRE 4 - P 143).

Nous nous contenterons donc de rappeler les avantages et les inconvénients de chacun, les limites de taille dans lesquelles nous estimons qu'il offre un intérêt, et des généralités sur sa mise en œuvre.

Nous développerons surtout les tables d'échantillonnages et l'étude des structures qui leur seront associées.

A ■ LE BOIS

Le bois est utilisé actuellement sous trois formes, le bois massif en construction traditionnelle ou « améliorée », le contreplaqué, le bois moulé.

Nous avons vu au CHAPITRE 4 DU TOME 2 qu'en dehors des composites utilisant des renforts dits « exotiques », il surpassait tous ses concurrents, sauf sur deux points liés à des contraintes de choc : sa faible absorption d'énergie et sa dureté, bien que ce dernier point puisse être amélioré par des revêtements adaptés. Enfin, étant un matériau naturel, ses caractéristiques mécaniques varient en fonction de son environnement, et il est sensible à la dégradation biologique. Mais là encore, les résines synthétiques modernes lui permettent de conserver dans toutes les circonstances ses qualités, et cela pour une durée qui semble extrêmement prometteuse.

Deux organismes sont chargés de l'étude et du développement du bois et des techniques forestières :

- **Centre Technique du Bois**
10, Avenue de Saint-Mandé - 75012 Paris
- **Centre Technique Forestier Tropical**
45 bis, Avenue de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne

Tous les bois ne conviennent bien sûr pas à la construction navale. Le TABLEAU 5-I donne les caractéristiques des principaux et l'on se reportera à l'ouvrage intitulé : « *Les méthodes modernes pour construire son bateau en bois* » (7) où j'ai largement développé ce sujet, ainsi qu'au *dossier 11* « *Le matériau bois* » de *Loisirs Nautiques* (8).

1 CONSTRUCTION TRADITIONNELLE

La construction traditionnelle à franc-bord ne se rencontre plus guère aujourd'hui pour des raisons diverses liées avant

TABLEAU 5/I

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CARACTÉRISTIQUES DES BOIS

Essence	densité moyenne	utilisation	solidité	durabilité	cintrage	usinage	pointage vissage	collage
Acajou d'Afrique (ou Grand Bassam)	0,5	1/2/3/4	XX	X	XX	XX	X	XX
Acajou d'Amérique (ou Honduras)	0,5	1/4	XX	XX	XX	XX	XXX	XXX
Angélique	0,8	1/2/3	XXX	XXX	XX	X	XXX	XX
Assaméla (Afrormosia)	0,7	1/2/3/4	XXX	XXX	XX	XX	XX	XXX
Chêne	0,75	1	XXX	XX	XX	XX	XX	XX
Epicéa (ou sapin blanc)	0,45	2/3/5	XXX	XX	XX	XXX	XX	XXX
Frêne	0,7	3	XXX	0	XXX	XX	X	X
Iroko	0,7	1/3/4	XX	XXX	XX	XX	XXX	XX
Makoré	0,65	1/3/4	XX	XX	X	XX	X	XXX
Mélèze	0,65	2/3	XXX	XXX	XX	XXX	XX	XX
Niangon	0,7	1/4	XX	XXX	XX	XX	XXX	XX
Okoumé	0,45	4 *	XX	XX	X	X	XX	XXX
Orme champêtre	0,75	1/2/3	XXX	X	XX	XX	XXX	XX
Pin de Douglas (ou d'Orégon)	0,55	2/5	XXX	XX	XX	XXX	XX	XXX
Pin sylvestre (ou sapin rouge)	0,6	2/3	XX	XX	XX	XXX	XX	XX
Pitchpin	0,7	2	XX	XXX	XX	X	X	XX
Ramin	0,6	2/5	XX	XX	XX	XXX	XXX	XXX
Robinier (ou faux acacia)	0,8	3	XXX	XX	XXX	XX	X	XX
Sapelli	0,65	1/3/4	XX	X	X	XX	XXX	XXX
Sipo	0,6	1/2/3/4	XX	XX	XX	XX	XXX	XXX
Spruce sitka	0,45	2/5	XXX	X	XX	XXX	X	XXX
Teck (Asie)	0,7	1/4	XX	XXX	XX	XX	XX	XX
Tola (Agba)	0,5	1/3/4	XX	XX	X	XX	XX	XX
Western red Cedar	0,35	5/4 *	XX	XX	X	XXX	XX	XXX

Utilisation
1 - Quille, étrave et leurs composants massifs, varangues.
2 - Serres, lisses.
3 - Membrures et barrots lamellés.
4 - Bordé.
5 - Espars.

Solidité
Il s'agit de la résistance mécanique prise globalement et relativement à la densité.

Durabilité
Le frêne ne pourra être utilisé qu'en intérieur et dans des parties visibles, barrots sans vaigrage par exemple, et non soumises à l'humidité des fonds.

Cintrage
Ici, aussi, il s'agit de la facilité de cintrage relative à la densité.

Pointage - vissage
Se trouvent incluses, la facilité d'enfoncement, la résistance à l'éclatement et la tenue. C'est pourquoi, par exemple, pour le frêne ou le makoré je n'ai donné qu'un X car si la tenue est excellente dans les deux cas, il est presque impossible d'enfoncer une pointe dans le premier et le second se fend très facilement.

Collage
Généralement peintures et vernis et facilité de collage vont de pair.

* plis intermédiaires

tout au manque de charpentiers qualifiés, à la difficulté de se procurer des bois de qualité et à l'investissement à long terme que représente la tenue de ce stock. Elle ne nécessite pas de gros investissements en outillage ni en infrastructure, s'adapte à toutes les conditions climatiques et, pour ces raisons, offre une souplesse inégalée qui permet encore à quelques artisans de qualité ou locaux d'en vivre.

Elle connaît depuis quelques années un renouveau grâce au développement de la restauration et de la construction de répliques de navires anciens.

Sur le plan technique, les principaux reproches qu'on peut lui faire résident dans la faiblesse et le manque de rigidité des liaisons qui limitent la durée de vie et nuisent à l'étanchéité du bordé.

Par ailleurs, cette faiblesse des liaisons oblige à surdimensionner les éléments qui leur sont associés et conduit à une augmentation de poids.

Un des premiers moyens de pallier à cet inconvénient a été l'adoption de la construction à clins qui, en liant directement les bordés entre eux, assure une meilleure étanchéité et, en plaçant leur joint à plat et non plus sur chant, permet d'en réduire l'épaisseur et d'alléger ainsi la construction.

Ce procédé, très développé dans les pays nordiques où l'on utilise beaucoup les résineux — qui s'y prêtent particulièrement bien — permet de réaliser des annexes et des embarcations légères jusqu'à 8 m environ.

Un second moyen a été la réalisation de bordés en double ou triple épaisseurs croisées à angle droit et rivées avec

interposition de toiles enduites d'un produit assurant l'étanchéité, généralement à base de céruse.

Avec l'apparition de colles résistant à l'eau, on a essayé de remédier aux défauts de liaison et d'étanchéité en collant les joints des bordés.

Cette méthode, dont le chantier italien Sangermani s'était fait une spécialité, n'est pas à la portée du premier venu et nécessite une qualité de bois et de main-d'œuvre tout à fait exceptionnelle.

La construction en petites lattes collées et clouées sur chant est une variante de la précédente qui ne requiert peut-être pas autant de savoir-faire. Mais, quitte à se mettre les mains dans la colle, autant passer aux procédés modernes.

Il est bon, cependant, de connaître la construction classique, non seulement à titre purement historique, mais parce que l'on peut être amené à participer à la réfection de coques construites selon cette technique et que l'on y acquiert souvent de précieux enseignements sur les bois et leur utilisation *.

Pour le détail de la mise en œuvre de cette technique, on se reportera, en français, à l'ouvrage de R.M. STEWARD (1) et, si on peut les trouver d'occasion, à ceux de H. DERVIN (2) (3). En langue anglaise, il existe deux ouvrages de base : *Boatbuilding* de H.I. CHAPELLE (4) et, plus anecdotique mais moins intéressant, *The Common Sense of Yacht Design* de L.F. HERRESHOFF (5).

Pour les échantillonnages, on utilise beaucoup aux U.S.A. les tables de NEVIN ou de HERRESHOFF. On les trouvera dans *Skene's Elements of Yacht Design* (6).

De grands architectes américains comme Gary MULL les ont adaptées aux méthodes modernes.

Il est intéressant de les comparer aux *Rules and Regulations for the Construction and Classification of Wood and Composite Yacht* du Lloyd.

Toutes ces tables reposent sur un critère de taille du voilier. Pour NEVIN, c'est simplement la racine cubique du déplacement. Pour HERRESHOFF, un coefficient appelé *fundamental factor* **FR**, est calculé pour les différents éléments de la coque.

Ainsi pour le bordé, le pont, la quille, les serres, le **FR** dépend du déplacement et du rapport longueur/creux, alors que la section des membrures ne dépend que du déplacement.

Le TABLEAU ci-contre donne une comparaison des trois méthodes pour un même yacht.

L ht : 12,90 m
L fl : 9,15 m
Δ = **7 800** dm³
Pour le **Lloyd L = 11,4** **D = 2,60**

* Pour les passionnés du bois je ne saurais trop conseiller de s'abonner à la revue américaine *WoodenBoat*, Naskeag Road, P.O. Box 78, Brooklin, Maine 04616 - USA.

	NEVIN	HERRESHOFF	LLOYD
Bordé	25	26	27
Membrures (moyenne)	42 x 42	44 x 44	54 x 38
Espacement membrures	244	304	210
Quille (ép.)	115	70	120
Serres	60 x 100	60 x 60	60 x 107
Pont	25	26	27
Barrots (au centre)	54 x 35	61 x 34	68 x 47*
Espacement barrots	244	304	336

* Section maxi au centre.

On constate que les échantillonnages les plus légers sont fournis par HERRESHOFF et les plus lourds par le Lloyd. Les tables les plus simples sont celles de NEVIN, celles d'HERRESHOFF les plus compliquées.

Souvent, ces échantillonnages comportent des réductions vers les extrémités des pièces ou de la coque.

Enfin, ces tables et règles sont accompagnées de recommandations sur les bois à utiliser, les montages à adopter, la visserie, et même, au Lloyd, sur certains accastillages et équipements.

Bien sûr, aujourd'hui on ne construit presque plus de voiliers en bois traditionnel, mais il était bon de savoir que dans ce domaine on avait défini des règles cohérentes dans lesquelles tous les détails de la construction étaient prévus. Il n'en est malheureusement plus de même pour les matériaux utilisés de nos jours.

Il n'y a pas de limite inférieure de taille pour la construction classique. En revanche, même si l'on a construit de cette façon des yachts de course de 40 m, il faut bien reconnaître qu'au-delà d'une quinzaine de mètres les liaisons commencent à créer de sérieux problèmes de résistance de la poutre navire.

2 CONTREPLAQUÉ ET BOIS MOULÉ

Ces deux utilisations modernes du bois ont été groupées en raison du nombre de leurs points communs. On peut considérer, en effet, que la réalisation d'éléments en lamellé ou en bois moulé revient à la fabrication *in situ* d'un contreplaqué.

Par ailleurs, la structure des bateaux réalisés dans ces matériaux est en tous points identique.

Deux caractéristiques du bois massif, son instabilité dimensionnelle et son anisotropie, ont conduit à l'invention du contreplaqué. Sa constitution en plis minces et croisés élimine en effet ces deux contraintes. Chaque pli a très peu de nerf et ses déformations éventuelles sont contrariées par les plis voisins.

En outre, les caractéristiques en traction et compression selon les deux directions — parallèle et perpendiculaire au fil des plis extérieurs — sont assez proches, et ce d'autant plus que les plis sont plus minces et plus nombreux.

Un contreplaqué se caractérise par quatre paramètres : le type de collage, les essences de bois, le nombre de plis pour une épaisseur donnée et la qualité d'aspect des plis extérieurs.

Il n'existe pas en France, contrairement à la Grande-Bretagne (normes BS 1203 pour le collage et BS 1088 pour l'usage marin), de norme spécifique au contreplaqué pour application marine. Le collage doit répondre au moins soit au « type 4 » de la norme NF B 54-154 destiné aux emplois extérieurs, soit à des normes spécifiques comme la A 004 de la Marine Nationale.

Les plis doivent être minces et d'épaisseur sensiblement égale. Sauf pour les éléments d'emménagement sans implication structurelle, on n'utilisera que des bois durs, bien qu'il existe d'excellents contreplaqués nordiques à base de résineux particulièrement résistants, tant sur le plan mécanique que vis-à-vis des agressions extérieures. Cependant, ils sont difficilement compatibles avec les résines synthétiques.

Selon la destination, les plis extérieurs peuvent être quelconques ou d'une essence exotique décorative, il en existe un vaste choix.

Les épaisseurs vont de 4 à 30 mm et les dimensions des panneaux de 244 x 122 cm à 310 x 153 cm, pouvant être assemblés par un joint en biseau ou scarf, en usine (jusqu'à 12 m) ou sur le chantier.

La résistance à l'impact du contreplaqué peut être considérablement améliorée par l'introduction, entre certains plis, d'un tissu de polyéthylène *Dyneema*. C'est ainsi que le contreplaqué *Multiforce* du fabricant néerlandais *Bruynzeel* offre une résistance à l'impact supérieure de 7 à 9 fois à celle d'un contreplaqué classique en acajou, et de 7 à 14 fois à celle d'un contreplaqué d'okoumé à épaisseurs et poids égaux.

Pour la réalisation d'éléments en lamellé ou de bordé en bois moulé, on utilise des plis de bois tranché de préférence au bois déroulé.

Les épaisseurs courantes vont de 2 à 5 mm pour des largeurs de 150 à 450 mm et des longueurs d'environ 3 m. Les largeurs seront resciées de 70 à 150 mm selon la courbure longitudinale de la coque.

Les essences sont essentiellement africaines, grand bassam, sipo, niangon, etc. On peut aussi utiliser des essences légères telles que l'okoumé, le spruce ou le red cedar pour des plis internes au bordé et qui constituent avec les plis extérieurs en bois dur une sorte de sandwich permettant, à poids égal, d'obtenir une rigidité plus grande du bordé.

Alors que les éléments de structure transversaux, qui ont plus un rôle de liaison que de renfort, sont généralement réalisés dans les mêmes essences que le bordé, les éléments de structure longitudinaux sont plus souvent en résineux qui offrent de meilleures performances mécaniques, à condition que leur teneur en résine n'affecte pas les collages. Pour la même raison, difficulté de collage, on évite les bois gras, makoré, douka, teck (à moins de pouvoir leur faire subir un dégraissage) et les bois riches en tanin, chêne, frêne.

Le taux d'humidité des bois ne doit pas être supérieur à 15 % et se tenir de préférence entre 10 et 12 %.

Les colles sont soit des produits spécifiques comme les urées-formaldéhyde ou les résorcines-formaldéhyde, soit des adaptations de résines d'emploi général comme les polyuréthannes ou les époxydes.

À l'exception de certaines polyuréthannes monocomposant, toutes ces résines polymérisent à l'aide d'un catalyseur, ou durcisseur, qui doit leur être ajouté en proportion précise. La polymérisation ne peut se faire correctement que dans des limites de température et d'humidité assez étroites, 18 à 22°C et moins de 60 % d'humidité, mais pas moins de 45 % pour les polyuréthannes monocomposant qui polymérisent avec l'humidité de l'air.

Cela implique un contrôle de l'ambiance qui ne peut être assuré correctement que dans un local clos.

Les époxydes, qui ont aujourd'hui supplanté pratiquement toutes les autres colles, sont utilisées également pour améliorer les caractéristiques mécaniques du bois (en particulier en compression) ainsi que pour le protéger des agressions du milieu selon un procédé développé aux Etats-Unis par les frères Gougeon, sous le nom de *West System* *.

Un système analogue, sous la marque *SPSystem*, est représenté en France par les établissements *Charles*** importateurs également des contreplaqués *Bruynzeel*.

Les polyuréthannes sont employées également pour assurer la protection, en particulier contre les U.V., du bois et des résines époxydes.

Toutes deux sont utilisées comme matrice des revêtements à base de fibre synthétique ou de verre.

a ▪ Structure et construction des coques en contreplaqué et bois moulé

Bien qu'il arrive parfois que le bordé soit réalisé indépendamment dans (ou sur) un moule, la méthode la plus couramment utilisée consiste à construire d'abord la structure, généralement quille en l'air, puis à la recouvrir du bordé.

* Représenté en France par Boero, 28, Rue Debussy - BP 242 - 17012 La Rochelle - Cedex 01.
** Charles, 111, Rue de Stalingrad - 93100 Montreuil

La structure est constituée par le maximum d'éléments d'emménagements, cloisons transversales et longitudinales, porques, varangues, et par des éléments longitudinaux représentés par les pièces de quille, les serres et lisses. Des gabarits provisoires sont placés entre les éléments de structure pour compléter le quadrillage et donner sa forme à la coque et, pour la construction en bois moulé, des lisses relativement serrées assurent le soutien des premiers plis de bois tranché. En construction industrielle, si la série est importante, un bâti métallique assure le positionnement correct et la tenue de tous les éléments de structure. La coque démoulée est prête à recevoir son pont et ses superstructures.

Tous les détails de ce type de construction et de quelques autres variantes sont donnés dans l'ouvrage intitulé : « *Les méthodes modernes pour construire son bateau en bois* » (7). On pourra également se reporter aux différents dossiers et hors série de *Loisirs Nautiques* (**9-10-11-12**).

La construction en contreplaqué s'applique à toutes les tailles de bateau, jusqu'à une quinzaine de mètres. Au-delà, la dimension des panneaux augmente le nombre des joints et leur épaisseur limite celle du bordé, à moins d'avoir recours à des contrecollages toujours délicats. Il faut signaler cependant qu'on réalise couramment des vedettes en contreplaqué jusqu'à 25 m. Bien que quelques essais de construction en forme aient été tentés, en forçant des plis de contreplaqué superposés sur une armature solide, et qu'un chantier français ait construit de grandes coques sur ce principe, le contreplaqué implique des formes développables et n'est pratiquement utilisé que pour des coques à bouchains vifs, simple ou double, avec fond en V ou plat.

Le bois moulé s'applique à des coques de toutes dimensions jusqu'à des maxi de 80' de rating comme *Windward Passage* ou *Christine*, ou des croiseurs de 90' comme *Whitefin*.

L'amélioration du bois par l'imprégnation d'époxydes et des renforts de fibres de carbone assure, dans ces dimensions, des performances mécaniques qu'aucun autre matériau ne peut actuellement égaler.

Un des principaux écueils à éviter dans la conception d'une structure en contreplaqué ou bois moulé est la faiblesse des éléments longitudinaux dans la partie supérieure de la coque, pont et superstructures. Le bois ayant une résistance en compression plus faible qu'en traction, le moment des sections des éléments supérieurs par rapport au centre de gravité de la section de coque doit être plus élevé que celui des sections des éléments inférieurs.

On conservera ainsi un taux de contrainte relative à peu près égal entre les deux parties supérieure et inférieure de la coque et une excellente raideur de la poutre navire. Des cloisons assurant généralement la résistance transversale de la coque et la forme du pont et des roufs, on préférera aux barrots des élongis pour assurer leur soutien. Il ne faut pas omettre non plus le rôle très important de raidisseur de tous les éléments longitudinaux des emménagements.

Pour des coques de compétition, on pourra d'ailleurs prévoir une véritable structure de raidissement interne à partir de panneaux verticaux largement ajourés reliant pont et coque et constituant la façade des emménagements. Grâce à la facilité de mise en œuvre du contreplaqué et aux multiples possibilités de renforcement localisé, on peut ainsi réaliser des structures légères et extrêmement rigides.

Pour tenir compte des efforts de cisaillement, il ne faut pas oublier de renforcer tout croisement non bloqué entre des éléments longitudinaux et transversaux par des goussets augmentant la surface des collages ou par un moyen mécanique, rivet, vis ou cheville de bois dur. Ceci est valable en particulier pour les membrures en lamellé fabriquées *in situ* à l'intérieur des lisses.

Lorsqu'on atteint des dimensions importantes, dès une douzaine de mètres, un bordé en bois moulé nécessite un nombre de plis qui accroît rapidement le temps nécessaire à la construction. On pourra alors passer à une construction mixte en petites lattes bouvetées, collées et clouées, recouvertes de plusieurs plis de bois moulé. L'épaisseur totale de ceux-ci devra correspondre au moins au quart de celle du bordé total pour conserver une bonne résistance au cisaillement.

Un autre gros avantage de cette méthode est de supprimer toutes les lisses intérieures. On ne gardera qu'une serre de bouchain, en cas d'échouage sur le côté, sur laquelle on fera aboutir les varangues qui pourront être lamellées dans la coque, une fois celle-ci retournée.

C'est ainsi qu'a été construit le plus grand voilier de course *, en bois moulé (à ma connaissance) le 90' *Whitefin* de 85 t sur plan de Bruce KING. Le bordé de 2 1/4" (57 mm) est constitué d'une couche de petites lattes de 3/4" (19 mm) et de quatre plis en diagonale de 1/4" (6,3 mm) en white cedar (*Chamaecyporis thyoides* ou *Thuja occidentalis*) un bois durable, résistant, très stable et léger (d = 0,3) qui pousse dans l'est des Etats-Unis.

Un dernier pli de 1/2" de *Port Oxford cedar* (une variété plus dense, d = 0,4 et aux caractéristiques mécaniques à peu près doubles) est placé en long sur l'extérieur, le tout étant collé et traité au *West System*. Toutes les pièces courbes sont lamellées en robinier qui constitue également les deux plis extérieurs des barrots, les cinq autres étant en white cedar. Les planchers et les meubles sont en if et les finitions en acajou du Honduras.

* Le plus grand voilier serait en effet le yawl de croisière *Antonia* de 131'3" (40 m) sur plan de Jay R. BENFORD. Bordé de 45 mm en cinq plis d'acajou du Honduras sur lisses espacées de 16' (406 mm) et membrures et cloisons espacées au minimum de 2 m.

Depuis peu, un importateur de bois britannique, Joseph Thompson*, commercialise des profilés en western red cedar sous la marque *Speed Strip*. Les sections vont de 9 x 19 mm à 44 x 70 mm. Un voilier de 107' sur plans Marc LOMBARD est actuellement en construction en Turquie. Il faut cependant signaler que le système des lattes bouvetées n'a pas été inventé par ce fabricant, car il était utilisé dès 1962 par les Constructions Mécaniques de Normandie pour la construction du Maïca en bois.

b ▪ Échantillonnages

Le TABLEAU 5-II donne les principaux échantillonnages pour la construction en contreplaqué et en bois moulé en fonction du déplacement D. Il n'est pas question de l'utiliser brutalement et des commentaires sont nécessaires pour adapter chaque élément aux cas particuliers.

Bordé en bois moulé : jusqu'à 18 mm d'épaisseur, le bordé est entièrement en bois moulé. Il est bon que le pli intérieur soit un peu plus rigide que le suivant pour mieux assurer la forme. Cela peut être obtenu par une épaisseur plus forte (par exemple 4 + 3 + 4 = 11) ou par une essence plus légère (3 acajou + 3 okoumé + 3 acajou = 9). A partir de 22 mm, et en tout cas au-delà de 25, le bordé peut être réalisé en petites lattes recouvertes de plis de bois moulé pour un quart au moins de l'épaisseur totale (ex. : 19 + 2 x 3 = 25). Dans ce cas les lisses sont supprimées.

Si l'on prévoit un revêtement plastifié armé de 300 g/m² de verre, on pourra réduire l'épaisseur de 1 mm. Avec une imprégnation et un collage époxy, on peut envisager une diminution d'épaisseur de 10% pour le bois moulé, de 5% pour le bordé mixte.

Le **tableau arrière** sera de même épaisseur que le bordé et renforcé, selon sa forme (plat ou courbe) et sa surface, de lisses et de montants, dont au moins un, central, bordera un gousset en contreplaqué reliant la quille, le tableau et l'élongis central de pont.

Lisses, en bois moulé : l'espacement des lisses est dicté par la mise en forme du premier pli ; plus celui-ci est mince, plus leur espacement doit être réduit. On aura ainsi de 180 mm pour un pli de 3 mm à 250 mm pour un pli de 5 mm.

Si une serre de bouchain est prévue, elle sera de même section que celle donnée pour le contreplaqué.

Bordé en contreplaqué : les deux chiffres correspondent pour le premier aux flancs et, pour le second, au bouchain et au fond. Dans le cas d'un dériveur intégral à fond plat, on réalisera celui-ci en deux épaisseurs de bordé de flanc. La dimension des panneaux ne sera pas supérieure à 2 m x 0,50 m pour les bordés de côté et 1 m x 0,40 m pour ceux des fonds.

* Joseph Thompson, Hendon Lodge Sawmillis, Sunderland SR1 2PA G.B.

On peut faire les mêmes observations concernant le revêtement en plastique armé. Le revêtement époxy, qui ne touche ici que les faces extérieures, ne permet pas une réduction supérieure à la tolérance sur l'épaisseur.

Lisses, en contreplaqué : s'agissant d'une coque à bouchains vifs, leur espacement est dicté par la largeur des panneaux entre bouchains, leur écartement ne sera pas inférieur à 400 mm.

Serres de bouchain : la hauteur dépend en fait de l'angle du bouchain. On s'arrangera pour que les largeurs de collage soient au moins égales à trois fois l'épaisseur du bordé.

Dans une construction composite-époxy, les serres de bouchains, comme les bordures de cloisons, pourront être remplacés par un joint-congé renforcé. Sa largeur sur chaque face sera au moins égale à 3 fois l'épaisseur du bordé et celle du renfort à 6 fois, avec un dégradé jusqu'à 9 fois s'il y a plusieurs épaisseurs.

Cloison de mât : il s'agit de la cloison principale située dans le plan du mât et sur laquelle est repris le haubanage. On tiendra compte des ouvertures pour déterminer les renforcements nécessaires : barrots, varangues, épontilles. Si la cloison ne se trouve pas au droit du mât et constitue, avec une autre cloison proche, un caisson, la somme de leurs épaisseurs ne sera pas inférieure à 150% de celle de la cloison normale, répartis selon leur distance par rapport au mât. Si celui-ci est posé sur le pont, on prévoira une cloison longitudinale de même épaisseur que la cloison normale, renforcée à sa partie supérieure par un support d'étambrai repris sur les barrots de renfort des deux cloisons voisines.

La cloison de mât peut également être renforcée par une porque lamellée dont les dimensions seront doubles de celles des membrures. Si les lisses y sont encastrées, l'épaisseur sera augmentée de la moitié de la profondeur de l'encoche.

Dans toute la mesure du possible, la porque inclura la forme du rouf, bien qu'il soit souvent difficile de lui faire suivre la cassure que constitue l'angle inférieur de l'hiloire. Dans ce cas, un plat d'acier boulonné à l'intérieur renforcera cette cassure. Dans les angles des serres, des remplis permettront d'obtenir le rayon nécessaire au cintrage.

Lorsque les bas-haubans ne sont pas fixés au droit du mât, des goussets de même épaisseur que la cloison, ou un doublage donnant une épaisseur égale, seront prévus. Les goussets peuvent être bordés par un lamellé dans le cas où ils doivent être largement échancrés. Leur largeur au pont les amènera jusqu'à l'élongis le plus proche et, sur le bordé, ils descendront sur une hauteur au moins égale à la moitié du franc-bord et seront repris sur une lisse ou un élément d'emménagement horizontal lié au bordé.

Cloisons intermédiaires : ce sont les cloisons d'emménagement transversales ou longitudinales, totales ou partielles.

TABLEAU 5/II

ÉCHANTILLONNAGES DES COQUES EN CONTREPLAQUÉ ET BOIS MOULÉ

D kg	Bois moulé		Contreplaqué		
	Bordé	Lisses	Bordé	Lisses	Serres de bouchain
400	7	18 x 18	9	20 x 20	50 x 25
850	9	20 x 20	9-12	25 x 25	60 x 30
1 700	11	23 x 23	12-15	30 x 30	70 x 35
3 000	13	25 x 25	12-15	35 x 35	80 x 40
5 000	18	30 x 30	15-18	40 x 40	90 x 45
10 000	25-22	35 x 35	20-23	45 x 45	100 x 50
15 000	30-25	35 x 35	—	—	120 x 60
20 000	40	—	—	—	150 x 75

D kg	Éléments communs									
	Cloison de mât	Coison inter.	Quille	Serre-bauquière	Membrures sur chant	Varangues	Pont	Barrots ou élongis	Hiloire de rouf	Toit de rouf
400	9	9	150 x 25	50 x 25	30 x 20	2-70 x 40	9	30 x 20	9	9
850	12	9	200 x 30	60 x 30	40 x 25	3-90 x 50	9	40 x 25	9	9
1700	15	9	200 x 35	70 x 35	45 x 30	4-110 x 60	12	45 x 30	12	9
3 000	18	12	250 x 40	80 x 40	55 x 35	4-125 x 70	12	55 x 35	12	10
5 000	20	12	250 x 50	100 x 45	60 x 40	5-145 x 80	15	60 x 40	15	12
10 000	23	12	300 x 60	120 x 50	70 x 45	6-160 x 90	20	70 x 45	20	15
15 000	26	15	300 x 75	150 x 60	75 x 50	8-180 x 100	26	75 x 50	26	20
20 000	30	15	350 x 100	180 x 75	90 x 60	10-215 x 120	30	90 x 60	30	26

Leur espacement ne sera pas supérieur à 2 m et, si elles ne sont que partielles, elles seront prolongées par une membrure ou une varangue assurant la continuité d'un livet à l'autre. Les cloisons, généralement de faible surface, n'ayant pas un rôle structurel peuvent bien sûr être d'épaisseur réduite.

Quille : sa largeur au centre est dictée par celle de la semelle du lest ou de l'aileron et par la surface de collage du bordé. Compte tenu de la contre-quille, dont la largeur est généralement égale à la portée du lest, la largeur de la quille lui sera supérieure, dans cette partie, d'au moins 6 fois l'épaisseur du bordé. Quelles que soient ses proportions, la surface de la section doit être conservée.

En avant et en arrière du lest, la largeur sera réduite progressivement en gardant cependant toujours pour le collage du bordé une largeur au moins égale à 3 fois son épaisseur.

La hauteur indiquée est prise au niveau de la râblure (FIGURES 5-1 ET 5-2). Elle devra être augmentée au niveau du brion et sur l'étrave pour conserver au collage du bordé la largeur suffisante et disposer de la place nécessaire à l'encastrement des lisses et serres. Elle est constituée de plis épais contrecollés dès que son épaisseur dépasse 25 mm, ainsi que dans la partie avant pour former l'étrave sans solution de continuité.

Pour les dériveurs en contreplaqué à fond plat, la quille sera divisée en deux éléments constituant les deux serres reliant le fond aux bordés de côté.

Lorsque le fond plat est associé à une quille, et non à une dérive, les serres de fond auront la même dimension que les serres de bouchains et la quille conservera la section prévue. Il est fortement conseillé de doubler la quille par une carlingue horizontale placée à plat sur le dessus des varangues et dont les extrémités se termineront sur la quille. Sa section sera égale à la moitié de celle de la quille. Sous le pied de mât ou de l'épontille, un rempli vertical reliera la carlingue à la quille entre les varangues situées en avant et en arrière, de même à l'extrémité de la semelle de lest.

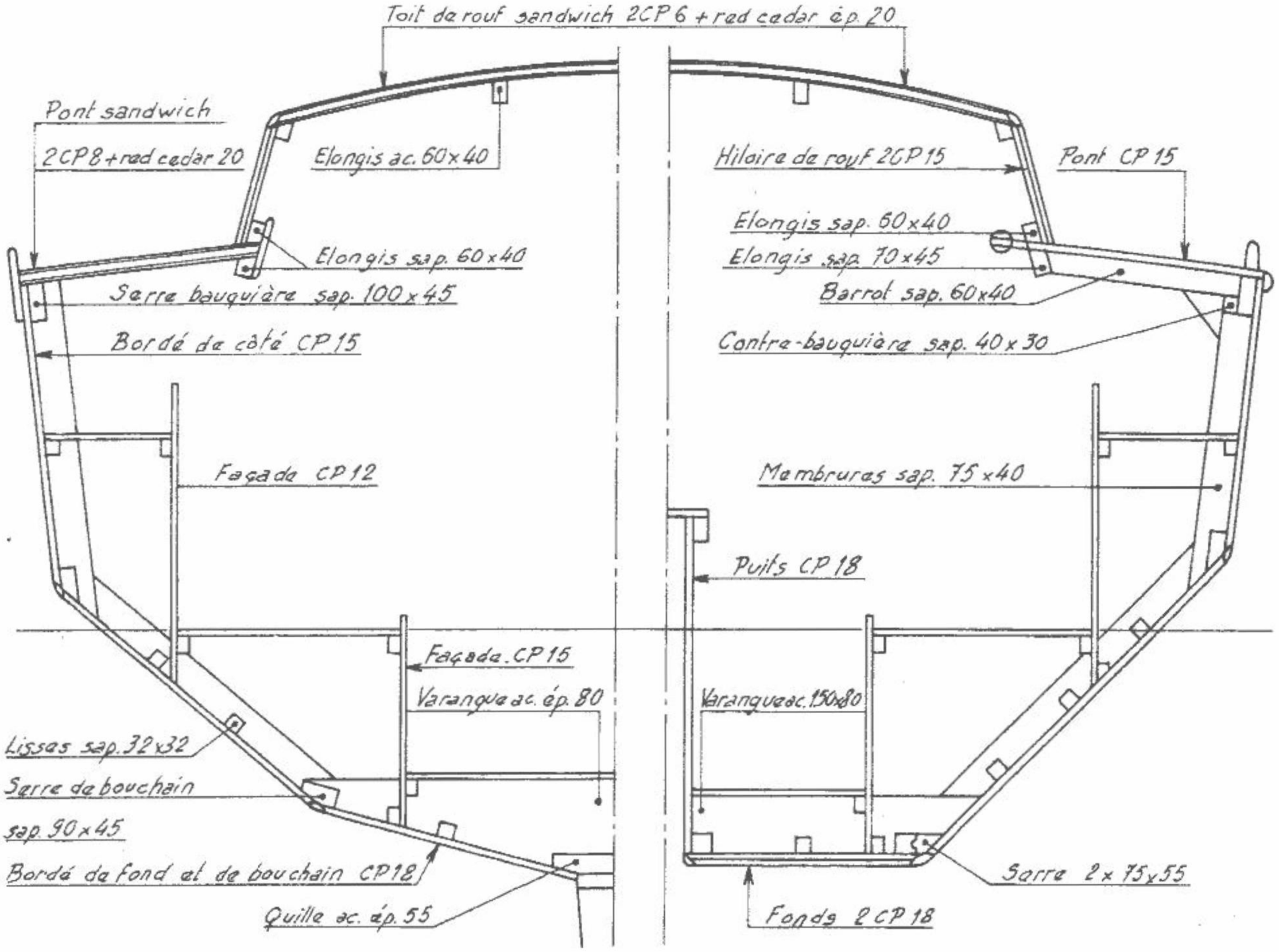


Fig. 5-1 • Deux exemples de construction en contreplaqué à bouchains vifs pour un croiseur hauturier de 10,50 m et de 6,5 à 7 t de déplacement.
À gauche, quillard avec fond en V. À noter le pont et le toit de rouf en sandwich contreplaqué/lattes de red cedar, permettant de supprimer le barrotage. Les lattes sont bouvetées et, sur le pourtour, le red cedar est remplacé par un résineux plus dense. Les élongis de toit de rouf prolongent ceux entourant le capot de descente et forment main courante.
À droite, dériveur intégral. Le pont est un simple contreplaqué sur barrots, soutenus par une contre-bauquière. À noter le prolongement intérieur du pont formant main courante et la serre de fond en deux éléments bouvetés pour faciliter le cintrage latéral Abréviations : **CP** = contreplaqué; **ac.** = bois durs de même qualité que l'acajou; **sap.** = résineux de même qualité que le sapin blanc.

Serre-bauquière : sa hauteur peut être réduite progressivement sur le quart avant et arrière jusqu'à 70 %, à condition de conserver une hauteur suffisante pour la fixation des barrots.

Plutôt que d'encastrer les barrots dans la serre-bauquière, il est préférable de les faire reposer sur une contre-serre dont la section sera égale à la moitié de celle-ci.

Membrures : elles peuvent être associées à une cloison ou une varangue, ou indépendantes, en bois massif ou en lamellé. Dans les deux tiers avant de la coque, sous la flottaison, elles ne seront pas espacées de plus de 700 mm. Dans le tiers central, elles remonteront jusqu'à la serre-bauquière.

Dans les parties non associées à un élément de cloison ou une varangue, si les lisses y sont encastrées, leur hauteur sera augmentée de la moitié de la hauteur de celles-ci. Lorsque les lisses ne sont pas encastrées, leur liaison avec la membrure sera renforcée par un gousset augmentant la surface de collage ou par un moyen mécanique, vis, rivet et (ou) cheville de bois dur collée.

Sur les coques à bouchain, les différents éléments des membrures seront décroisés ou reliés par des goussets. Il en sera de même pour leur liaison avec les barrots.

Varangues : comme pour la quille, la hauteur est essentiellement fonction de l'angle des fonds. Elle pourra être prise telle qu'indiquée pour une coque à fond plat. Pour un fond en V, elle représente une moyenne. Ne pas oublier de les prolonger jusqu'à un élément longitudinal de structure, au besoin par une membrure massive ou lamellée.

Pont : les épaisseurs indiquées sont celles d'un contreplaqué simple. Pour les fortes épaisseurs, on peut être amené, en raison de la courbure, à contrecoller deux ou trois épaisseurs.

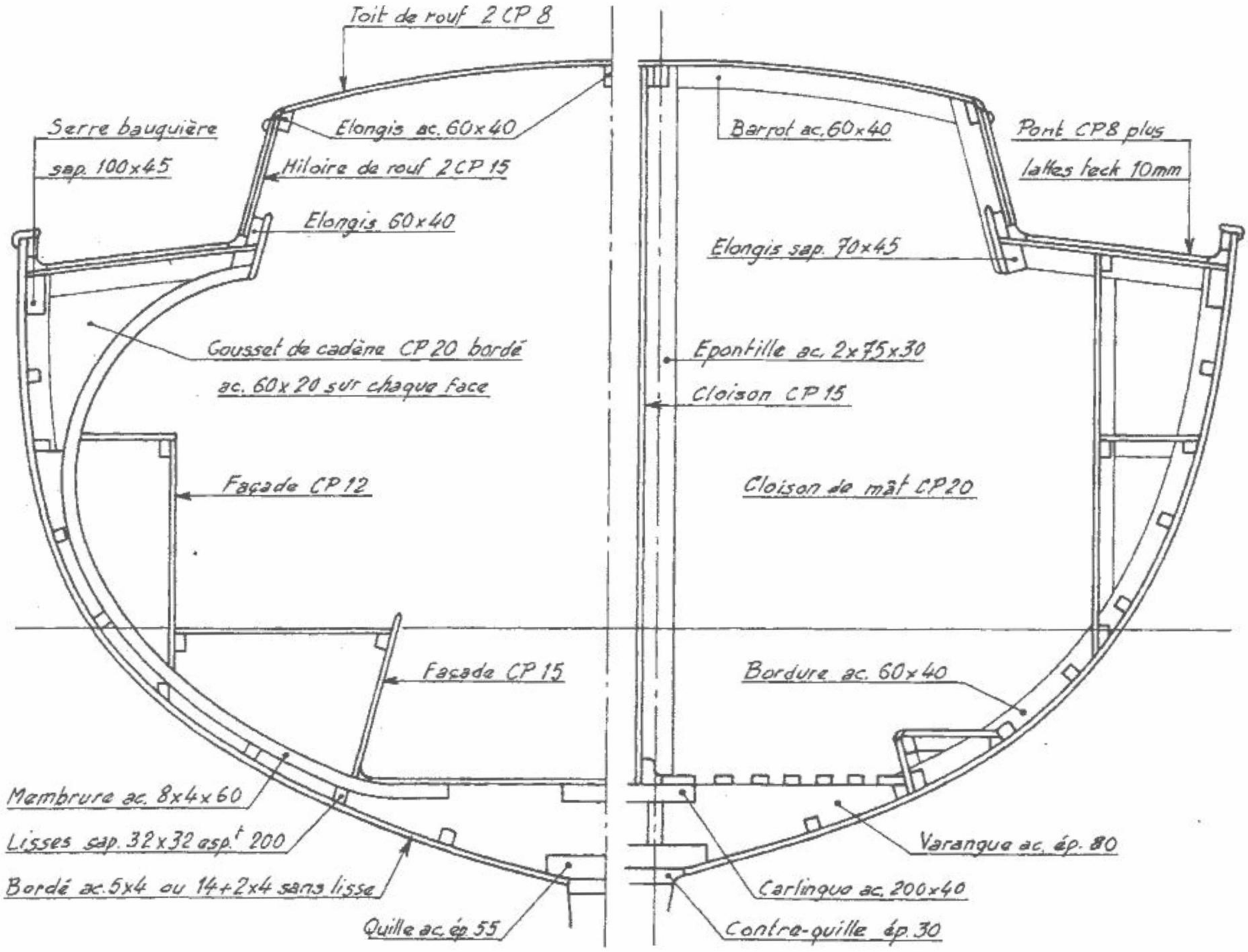


Fig. 5-2 • Exemple de construction en bois moulé d'un croiseur hauturier de 10,50 m et de 6,5 à 7 t de déplacement.
À gauche, section au droit du gousset de bas-hauban arrière. À noter la membrure lamellée prolongeant la varangue et bordant le gousset.
À droite, section en avant de la cloison de mât, vue vers l'arrière pour montrer la bordure de cloison.
Le pont est en contreplaqué recouvert de lattes de teck; noter les gouttières de raccordement au pavois et à la base des hiloires.
Certaines lisses sont utilisées (au moins partiellement) pour servir de support aux panneaux d'emménagements.
Dans les deux figures, les hiloires de rouf sont doublées pour tenir compte des ouvertures des hublots.

On peut aussi désirer un revêtement en teck. Dans ce cas, la structure de soutien sera de préférence constituée de barrots et le contreplaqué sera disposé avec le fil des plis extérieurs dans le travers. L'épaisseur totale sera par ailleurs accrue de 10 %.

Le pont peut également être réalisé en sandwich de deux contreplaqués avec une âme en red cedar ou en spruce, disposée en long. Les tasseaux constituant cette âme seront assemblés par bouvetage, comme un bordé en petites lattes. Il faudra veiller particulièrement à la continuité des collages pour éviter tout risque d'infiltration, comme d'ailleurs dans le cas de plusieurs épaisseurs contrecollées. Seules les colles polyuréthannes et époxydes peuvent convenir à ces assemblages. Le module de flexion de cette section sera égal à celui du contreplaqué simple avec ses élongis.

Comme dans le cas précédent, et de même lorsque la structure de soutien est constituée d'élongis, le contreplaqué sera disposé avec le fil des plis extérieurs sur le travers.

Barrots et élongis : quelle que soit la structure de soutien du pont choisie, il est à mon avis nécessaire qu'une partie au moins soit longitudinale. Les élongis des hiloires de rouf ne suffisent pas car, pour obtenir un bon équilibre de la section de la poutre navire, il faudrait que la somme des moments des sections de tous les éléments longitudinaux, par rapport au centre de gravité de la section de coque et situés au-dessus de celle-ci, soit au moins le double de ceux situés en dessous (quille, serres de bouchains), ceci pour tenir compte de la moindre résistance en compression. *

* Sauf en composite époxy où les caractéristiques du bois en compression sont largement améliorées.

Il sera donc bon, dans tous les cas, de prévoir un élongis central sur chant dans l'axe du pont, en avant et en arrière des superstructures, sur lequel viendront s'appuyer les barrots encastrés à mi-bois par-dessus. La hauteur à fond d'encoche sera égale à celle donnée dans le tableau.

Il est bon également de prolonger les élongis de rouf jusqu'à l'élongis central sur l'avant et jusqu'au tableau sur l'arrière.

La hauteur des barrots peut être réduite de 30% vers les extrémités. Cette réduction peut être effectuée sur toute la longueur du barrot s'il est supporté par des élongis, ainsi que pour les barrotins.

Hiloire de rouf : l'épaisseur indiquée est celle d'une hiloire pleine sans ouverture. S'il y a des hublots, l'entourage de l'ouverture sera doublé de façon à retrouver une section égale.

La face arrière du rouf sera d'une épaisseur au moins égale à celle des hiloires. Si sa surface est particulièrement grande, il sera renforcé par des montants.

Toit de rouf : on tiendra compte des mêmes considérations que pour le pont et, comme pour les hiloires, les ouvertures devront être compensées par des élongis.

3 PROTECTION DU BOIS

Le bois, produit naturel, est malheureusement biodégradable il est donc impératif qu'il soit efficacement protégé contre l'humidité qui, dans tous les cas, provoque une baisse des caractéristiques mécaniques et, dans certaines proportions et en liaison avec certaines conditions de température et d'oxygénation, favorise le développement de moisissures. Il doit être également protégé contre les animaux marins et les rayonnements du soleil et de la lune.

En bois massif, on peut utiliser les produits habituellement prévus pour la conservation des charpentes et des constructions terrestres, mais leur efficacité s'estompe souvent assez rapidement en atmosphère marine et il faut obtenir une garantie du fabricant de leur compatibilité avec les peintures qui seront employées.

Pour les constructions collées, le premier choix à faire sera de savoir si l'on adopte un revêtement renforcé ou non. Il faut bien considérer que celui-ci ne constituera qu'une protection contre les chocs et non un renforcement structural.

Ce peut être soit un tissu de polyamide (procédé *Cascover* ou similaire) ou de polypropylène (*Versatex*), malheureusement, ces procédés ne sont pas commercialisés en France, soit de la fibre de verre sous forme de mat ou de tissu léger (300 g/m^2).

Les renforts à base de fibres aramides (Kevlar - Twaron) ou de polyéthylène (Spectra, Dyneema), intéressant sur le plan de la résistance à l'impact, présentent malheureusement de très grandes difficultés pour le ponçage après enduisage.

Les résines utilisées pour leur collage sont soit des polyuréthannes, soit des époxydes, en particulier si celles-ci ont été déjà utilisées pour l'imprégnation du bois.

Dans les deux cas, il sera bon de procéder à des essais préalables, en particulier pour les bois gras et pour le contreplaqué dont la colle phénolique, qui diffuse à travers le pli extérieur, peut créer des problèmes de compatibilité avec les résines.

Il faudra, autant que possible, éviter les bois gras, leur préférer des essences absorbant bien la résine et de toute façon n'appliquer celle-ci que sur des surfaces impeccablement poncées, dégraissées et dépoussiérées.

Bien que plus difficile à appliquer et donnant une surface moins lisse, je pense que le mat est préférable, surtout pour les plus petites embarcations, car il se prête mieux à l'élasticité du bois.

En revanche, le tissu offrira une plus grande résistance à l'impact et une surface plus facile à enduire. Il convient parfaitement pour les plus grandes coques où le rapport des épaisseurs revêtement/bois devient très faible. On peut même alors prévoir, à partir d'une quinzaine de mètres, un mat de 300 g et un tissu de 150 g.

Si l'on n'a pas prévu de revêtement de renfort, le bois sera protégé par une impression à base d'oxydes métalliques qui ont des propriétés fongicides.

Dans les deux cas, les enduits et peintures qui suivront seront à base de résines polyuréthannes. Ce sont les plus imperméables et les plus résistantes aux rayonnements. Il existe des peintures époxydes, mais elles sont encore peu répandues pour l'application sur le bois et résistent moins bien aux rayonnements U.V.

B ▪ LE MÉTAL

Mis à part quelques cas isolés et les yachts d'une longueur supérieure à une vingtaine de mètres, l'utilisation du métal dans la construction de petites unités de plaisance est relativement récente, et a souvent été la conséquence d'un désir de diversification de chantiers travaillant auparavant dans la construction navale de commerce ou de pêche, voire militaire.

Deux alliages sont plus particulièrement utilisés, l'acier et l'alliage d'aluminium, ou alliage léger, dont il existe pour chacun une très grande variété de compositions.

Avant d'aborder l'utilisation pratique qui en est faite, il est bon de voir en quoi ces deux alliages se ressemblent et diffèrent dans leurs caractéristiques d'emploi.

Tous deux sont des matériaux isotropes, c'est-à-dire qu'ils possèdent des caractéristiques sensiblement égales dans

toutes les directions. Ils présentent également un écart important entre leur limite élastique et leur résistance qui en fait d'excellents absorbeurs d'énergie.

En cas d'échouement à la côte ou d'abordage, les coques en métal sont sans aucun doute celles qui résistent le mieux et le plus longtemps à une crevaison. Les exemples ne manquent malheureusement pas.

Les différences se situent essentiellement au niveau de la comparaison entre leurs performances mécaniques, leur prix matière et, dans une seconde approche, leur facilité et leur coût de mise en œuvre.

En reprenant le TABLEAU 4-XI - TOME 2 PAGE 137 nous voyons que si les performances en résistance à la traction sont sensiblement les mêmes, tant pour le bordé que pour la poutre navire, la rigidité des alliages légers est très supérieure. A taille égale, il sera donc possible de faire un bateau moins lourd en alliage léger qu'en acier, à condition de prévoir une structure plus serrée de lisses et de membrures afin de réduire la dimension libre des panneaux.

C'est un point qui est malheureusement souvent oublié et qui conduit à des bordés qui, au bout de quelques années, voire quelques mois si les conditions de mer ont été dures, « montrent leurs côtes ». Il est d'autant plus sensible que les alliages légers étant moins « élastiques » que l'acier, ils fluent plus facilement sous l'effet d'efforts répétés pendant longtemps. La structure devra être particulièrement resserrée dans les parties les plus soumises aux chocs de la mer, c'est-à-dire le tiers avant jusqu'à mi-hauteur du franc-bord.

Le prix matière est bien sûr largement en défaveur de l'alliage léger, environ cinq fois plus cher que l'acier. Il faut cependant pondérer cette différence par deux facteurs : le poids plus réduit de l'ensemble métallique du bateau, de 20 à 40 % (d'autant plus que la coque est petite) ce qui ramène le prix matière total en moyenne à 3,5 fois, et le fait que celui-ci ne représente guère plus de 10 à 15 % du prix total du voilier.

L'adage « deux fois plus léger, deux fois plus cher » que l'on attribue généralement à l'alliage léger ne se vérifie donc pas dans la pratique au niveau du voilier lesté classique terminé.

La facilité de mise en œuvre des deux matériaux n'est pas fondamentalement divergente, leurs particularités se situent sur des plans différents.

Utilisé dans de multiples domaines, l'acier bénéficie d'une expérience très vaste et à peu près universelle. Sa mise en œuvre ne nécessite pas d'installations sophistiquées ni de main-d'œuvre hautement qualifiée même si, dans notre cas, une bonne expérience de la construction de plaisance est nécessaire. Enfin, elle n'a pas besoin d'infrastructure lourde et peut s'effectuer par tous temps et sous toutes les latitudes (on peut même souder l'acier sous l'eau !), dans certaines limites toutefois, si l'on ne veut pas connaître trop de problèmes de soudure et voir la rouille dévorer la structure avant que la coque soit terminée, ou pour le moins alourdir considérablement les dépenses de décapage avant peinture.

En revanche, le poids plus élevé des éléments unitaires à manipuler nécessitera des moyens de manutention plus lourds.

Surtout, la moins grande malléabilité de l'acier nécessite pour son formage des moyens nettement plus puissants, mais moins de soins. C'est pour cela que l'on construit désormais peu de coques en forme, sauf dans les grandes tailles, et une majorité de coques à bouchains vifs.

On a souvent dit que l'acier était un matériau trop lourd pour réaliser des coques de voiliers en dessous d'une dizaine de mètres sans atteindre un déplacement prohibitif. Cela est vrai dans la mesure où l'on conserve une structure de renfort traditionnelle. Il semble, en fait, que les architectes n'aient pas su adapter celle-ci aux dimensions inférieures. En effet, il n'est guère possible, pour des raisons de soudure, de descendre pour le bordé en dessous d'une épaisseur de 3 mm dans des conditions courantes, ou de 2,5 mm avec des soudeurs expérimentés. On se trouve alors limité par un poids au mètre carré de bordé qui devient incompressible.

En Hollande, pays où la construction en acier a connu un développement tout particulier, on construit couramment des coques de moins de 8 m sans aucune autre structure que les plats, transversaux ou longitudinaux qui servent à fixer les emménagements (quand ce ne sont pas de simples goussets) et quelques portions de lisses ou de membrures dans les parties les plus sollicitées ou les plus plates des fonds, les carlingues moteurs, parfois les réservoirs. Sur les petits voiliers, les varangues sont réduites à un simple plat sur les fonds en V ou à un T, sur les fonds plats, soudé sur la tranche des tôles de quille qui traversent le fond pour remonter à leur niveau (13).

Les tôles doivent être découpées avec une très grande précision et les soudures sont, bien sûr, faites avec le plus grand soin pour éviter le maximum de déformations et les reprises qui seraient nécessaires pour assurer l'étanchéité. Dans ces conditions, il est tout à fait possible de construire des coques en acier d'un poids raisonnable à partir de 7 m environ.

Il faut signaler que le chantier Meta à Tarare (Rhône) applique un procédé assez proche de celui-ci, baptisé *Strongall*, bien que reposant sur une idée de départ un peu différente. Il considère en effet qu'un bordé plus épais que la normale permet de supprimer toute structure de renfort et a pour autre avantage d'être moins susceptible de déformations lors de la soudure.

Ce procédé semble cependant convenir mieux à l'alliage léger qu'à l'acier et son intérêt est fonction du rapport prix matière/prix main-d'œuvre.

En raison de sa malléabilité plus grande, l'alliage d'aluminium se prête beaucoup mieux au formage que l'acier, même

si, dans les deux cas, il est indispensable de pouvoir disposer d'une main-d'œuvre particulièrement qualifiée.

L'assemblage, qui se fait par collage et rivetage sur les petites unités en tôle mince ou sur celles demandant un respect du poids et une finition impeccables comme les voiliers de la Jauge Internationale, est réalisé le plus souvent par soudure sous atmosphère neutre.

Ceci, ainsi que les précautions nécessaires pour le tracé et la découpe du métal, demande une infrastructure plus importante que pour l'acier. Il n'est pas question ici de travailler en plein air.

D'autre part, étant issue de l'aéronautique et le matériau étant facile à usiner, la construction en alliage léger est souvent plus sophistiquée que celle en acier (découpes complexes, trous d'allégement, arrondis d'angle par formage). Tout ceci conduit à augmenter le nombre d'heures et le coût de celles-ci.

Pour juger précisément de la différence de prix entre construction en acier et alliage léger, le mieux pour l'architecte sera de se faire indiquer par les chantiers qu'il consultera le prix fini au kilo de la partie métallique seule. A condition que ceux-ci soient en mesure de le savoir, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas.

L'alliage léger ne connaît pratiquement pas de limite inférieure, les procédés d'assemblage s'adaptent à toutes les épaisseurs de tôle. Sertissage, rivetage, collage sont utilisés jusqu'à 3 mm, épaisseur à partir de laquelle la soudure prend le relais.

Il n'y a, on s'en doute, aucune limite supérieure à la construction métallique.

Pour connaître les méthodes de mise en œuvre, on pourra se reporter à l'ouvrage de Sylvestre LANGEVIN (**14**) ou au numéro hors série de la revue *Loisirs Nautiques* (**15**). Pour les constructeurs amateurs, signalons les ouvrages de Serge KERNILIS (**16**) et de Jean-Claude MUSNIER (**17**) qui décrivent la construction d'un bateau.

1 L'ACIER

C'est un alliage de fer et de carbone, plus parfois d'autres métaux (on dit alors qu'il est « allié ») et des impuretés dans une proportion contrôlée.

La désignation des aciers est définie par les normes NF A 02-005, A 02-025, A 35-501, A 35-552 et A 35-554, pour les aciers de base qui nous concernent. La norme A 35-600 fournira l'équivalence avec les normes étrangères.

Le TABLEAU **4-V - TOME 2 - PAGE 104** donne les caractéristiques des principaux aciers de base.

On distingue deux classes d'aciers :

- les aciers à résistance normale, dont la limite élastique minimale est inférieure à 27,5 daN/mm²;

- les aciers à plus haute résistance, dont la limite élastique est supérieure à 27,5 daN/mm².

Parmi les premiers, on trouvera les nuances *Véritas* qualité A (23,5 daN/mm²), et E 24-2 (23,5 daN/mm²) et E 28-2 (27,5 daN/mm²) de la norme A 35-501.

Dans les seconds, on utilisera les qualités *Véritas* AH 32 (31,5 daN/mm²) et AH 36 (35,5 daN/mm²) ou E 36-2 et 3 (35,5 daN/mm²).

On y trouvera également des « aciers améliorés » comme le *Marinor* (36 daN/mm²) ou les aciers à « résistance améliorée à la corrosion » (*Cor Ten* ou *Indaten*) qu'une adjonction de cuivre ou parfois de chrome et/ou d'aluminium rend moins sensibles à la corrosion atmosphérique non marine; leurs caractéristiques mécaniques sont également plus élevées.

Il faut noter que la limite élastique garantie est un minimum, le maximum pouvant être jusqu'à 20 % plus élevé.

Les produits finis qui en sont tirés sont des laminés donnant des tôles minces (moins de 3 mm), moyennes (3 à 5 mm) ou épaisses (plus de 5 mm) ou des profilés : méplats, ronds, cornières, T, I et U, et des tubes sans soudure.

Voir brochures : *Produits sidérurgiques français*, caractéristiques dimensionnelles de l'OTUA. Tome 1 : *Produits laminés* et Tome 2 : *Produits plats*.

Leurs dimensions sont données par les normes NF :

A 45-003 : Ronds laminés à chaud.
A 45-005 : Plats laminés à chaud.
A 45-007 : Petits fers U laminés à chaud.
A 45-008 : Fers T à ailes égales et inégales.
A 45-009 : Cornières à ailes égales.
A 45-010 : Cornières à ailes inégales.
A 46-402 : Tôles minces laminées à froid.
A 46-501 : Tôles d'épaisseur inférieure ou égale à 10 mm.
A 49-111 : Tubes sans soudure.
A 49-142 : Tubes soudés de diamètre inférieur ou égal à 168,3 mm.
A 49-642 : Tubes ronds soudés à partir de laminés à froid.
A 49-644 : Tubes ronds soudés à partir de laminés à chaud.
A 49-652 : Tubes carrés et rectangulaires à partir de laminés à froid.
A 49-654 : Tubes carrés et rectangulaires à partir de laminés à chaud.

Recueils de normes :

Produits sidérurgiques.

Tome 3 - *Aciers pour construction mécanique. Nuances et qualités.*
Tome 4 - *Aciers inoxydables.*

Tome 5 - *Dimensions et tolérances.*
Tubes en acier.
Tome 1 - *Tubes pour tuyauteries et usages généraux.*
Tome 3 - *Tubes pour usages mécaniques.*
Soudage et techniques connexes : 3 tomes.
Corrosion et protection des métaux : 3 tomes.

Les nuances les plus utilisées sont les aciers correspondant aux désignations E 24 et E 28, plus rarement les mi-doux E 36 ou les aciers améliorés.

Il ne faut pas oublier que plus la limite élastique est élevée, plus la construction pourra être légère, mais plus les tôles seront difficiles à former et à souder et moins elles pourront absorber d'énergie en cas de choc.

Par ailleurs, il faut s'assurer que l'on pourra trouver, dans la même nuance, les tôles et les profilés qui leur seront associés.

Même si quelques expériences ont été réalisées dans ce domaine, l'acier inoxydable ne me semble pas un matériau intéressant pour la construction des coques, en raison de sa faible limite élastique initiale et des incertitudes dans sa résistance à la corrosion en immersion alternée ou non.

On rencontre, en effet, de grandes difficultés pour uniformiser les caractéristiques galvaniques des différents éléments entrant dans la construction et empêcher les modifications apportées par la soudure. Marcel BARDIAUX qui fut le premier à construire un voilier en acier inoxydable en était arrivé à usiner sa visserie dans les chutes de tôle de ses bordés.

On le réservera donc à des pièces de petite surface soumises à un ragage important ou pour baguer des trous supportant une forte usure comme ceux des cadènes, des fémelots de gouvernail ou des axes de dérive. Il est intéressant de savoir qu'on peut le souder sur des aciers ordinaires avec des baguettes appropriées tout au moins lorsque les pièces à assembler ne sont pas immergées. *

Les tôles et certains profilés peuvent être livrés bruts ou protégés soit par un revêtement de zinc obtenu par galvanisation ou électro-zingage, soit par une pré-peinture assurant en plus l'accrochage des peintures ultérieures.

Seules les tôles pré-peintes peuvent présenter un réel intérêt en construction de plaisance. Elles permettent l'économie du sablage et offrent un meilleur accrochage aux peintures. Encore faut-il s'assurer que leur préparation soit compatible avec la ligne de produits qui sera utilisée, et l'on ne peut éviter le décapage mécanique des zones dégradées par la soudure. Le choix doit donc se faire à partir de bases économiques chiffrées. Elles doivent répondre aux normes NF A 35-511 et 512.

Deux organismes fournissent les renseignements sur l'acier et ses utilisations :
- l'OTUA - Office technique pour l'utilisation de l'acier. **
- le BNS - Bureau de normalisation de la sidérurgie.

Tous deux sont situés à l'adresse suivante :
Immeuble Pacifique, 11, Cours Valmy, 92070 Paris-la-Défense Cedex.

On peut également se documenter auprès des grandes sociétés sidérurgiques comme Usinor.

La découpe des tôles s'effectue par les moyens mécaniques habituels : scies, cisailles, disques, ou par oxycoupage pour les tôles épaisses. Les chants doivent être meulés pour faire sauter le métal modifié par l'échauffement et leur donner l'angle nécessaire à la bonne formation du cordon de soudure.

L'assemblage des éléments de coques en acier s'effectue aujourd'hui à peu près uniquement par soudure manuelle à l'arc électrique avec des électrodes à enrobage basique ou rutile.

On pourra se renseigner sur la soudure des métaux auprès de l'OTUA *** déjà cité, de la SAF (Soudure Autogène Française), 15, Rue d'Epluches, 95130 Saint-Ouen l'Aumôme ou de l'Institut de Soudure, 90, Rue Vanesses, Z.I. Paris Nord II, 93420 Villepinte.

Trois types de cordons de soudure sont utilisés, le cordon continu, partout où une étanchéité est nécessaire, le « chenillage » pour la fixation des renforts de structure, en « bouchon » pour les pièces non accessibles.

Le cordon continu peut être fait en une ou plusieurs passes selon la précision de l'approche des tôles, leur épaisseur et l'importance structurelle de la soudure. Ainsi les soudures du bordé sont pratiquement toujours faites en au moins deux passes, la première intérieure, la seconde extérieure (FIGURE 5-3).

Le chenillage est une succession de cordons courts, de 5 à 7 cm, alternés sur les deux faces de la pièce à souder et séparés d'une dizaine de centimètres. Il permet d'atténuer les déformations de tôle qui sont la rançon des soudures continues.

Les soudures bouchon se font sur le bord d'un trou ou d'une lumière placé en face de la pièce à souder lorsqu'il n'est pas possible d'accéder à l'angle que font les deux pièces entre elles. C'est le cas par exemple de la soudure des tôles de quille ou de safran sur leurs nervures intérieures.

La représentation symbolique des soudures sur les plans est donnée par la norme NF E 04-020.

Dans toute la mesure du possible, on évitera la rencontre de trois cordons de soudure. Lorsque trois pièces se rejoignent, le coin de l'une d'entre elles sera coupé, de préférence en arc de cercle, pour dégager l'angle. De même pour toutes les pièces aboutissant sur un cordon continu, comme les goussets de renfort des membrures sur le bouchain.

* Brochure : *Conseils pour le soudage des aciers inoxydables,* OTUA 1983
** Demander le catalogue *Publications Acier* et le *Carnet d'adresses acier.*
*** Brochure : *Conseils pour le soudage des aciers de construction métallique et chaudronnée à limite d'élasticité garantie* < 420 N/mm². OTUA 1980.

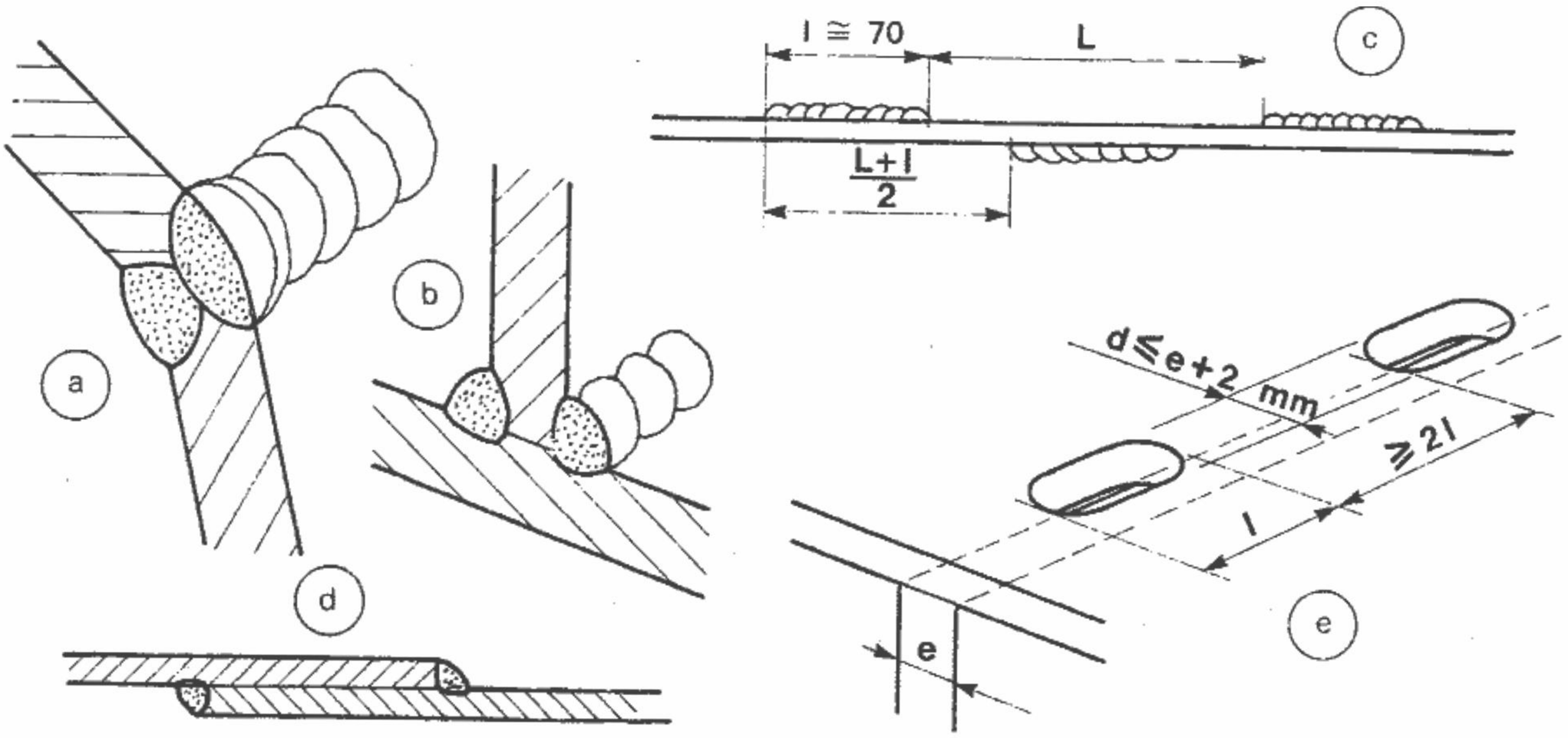


Fig. 5-3 • Différents types de soudures :
a) soudure d'angle bord à bord sur un bouchain : pointage extérieur, première passe intérieure, seconde passe extérieure ;
b) soudure d'angle sur chant avec cordon continu sur chaque côté ;
c) soudure d'angle sur chant avec cordon discontinu alterné ou « chenillage » ;
d) soudure par recouvrement ;
e) soudure bouchon.

L'architecte devra toujours veiller à la facilité d'accès aux joints à souder, non seulement la baguette, sa pince et la main du soudeur doivent y trouver leur passage, mais aussi le marteau à piquer. Combien de fois ai-je vu sur des plans des soudures irréalisables parce qu'inaccessibles. Sur l'étrave où les tôles font un angle aigu avec le prolongement du plat de quille, il sera souvent nécessaire de former une tôle en arrondi pour dégager suffisamment les cordons de soudure.

L'architecte doit avoir également une bonne connaissance des déformations provoquées par la soudure pour équilibrer correctement celles-ci.

C'est un point particulièrement important lorsqu'une symétrie rigoureuse doit être respectée.

Si le chantier est réellement expérimenté, il doit lui indiquer sa façon de procéder, ses tours de main, propres à chacun et qu'il est préférable de ne pas contrarier. Une collaboration étroite est indispensable dans des cas comme celui-ci où conception et mise en œuvre se rejoignent étroitement.

La soudure peut être affectée de multiples défauts, cordon trop épais ou creux, défauts de pénétration, inclusions, souillures, porosités, fissures, etc.

Il est indispensable que l'architecte sache reconnaître ceux-ci. Pour cela, on se reportera à la norme NF A 89-230, *« Classification des défauts dans les assemblages soudés par fusion avec commentaires explicatifs »*.

Néanmoins, seule l'expérience peut servir d'enseignement et l'on ne peut trop recommander à l'architecte qui désirerait exercer ses talents dans ce domaine de suivre les stages organisés par l'OTUA ou la SAF et de voir travailler les chantiers.

Il existe un certain nombre de moyens de contrôle des soudures terminées. Le plus couramment utilisé est le ressuage, facile à mettre en œuvre et qui, à mon avis, devrait être réalisé systématiquement sur toute coque terminée. Pour effectuer cette opération, on applique d'un côté de la soudure un révélateur, du lait de chaux, de talc ou de blanc de Meudon, qu'on laisse sécher et, de l'autre côté, un produit très mouillant tel que du pétrole coloré, par exemple. Celui-ci s'infiltre par les fissures et apparaît sous forme d'auréoles sur le révélateur. Le même procédé peut être utilisé lorsque l'on n'a accès que sur un seul côté de la soudure. Le produit mouillant est alors appliqué d'abord, puis, lorsqu'il a bien

pénétré, on essuie soigneusement le surplus. On passe alors le révélateur qui absorbe le pétrole qui s'était infiltré dans les fissures. Dans les deux cas, on marque au crayon les zones concernées, on meule le cordon et on le reprend, mais le nombre de ces reprises est vite limité.

Dans des cas particulièrement graves ou portant à contestation, on peut utiliser des moyens plus sophistiqués comme la radio ou la gammagraphie, ou l'analyse par ultrasons, mais ils nécessitent un matériel et un personnel spécialisés et coûtent cher.

Nous avons déjà dit ce que nous pensions de l'usage de l'acier inoxydable pour la réalisation de coques, nous n'y reviendrons pas. En revanche, c'est un matériau que l'on rencontrera parfois dans des structures en acier non allié pour des pièces d'usure et surtout dans les pièces d'accastillage.

Les alliages utilisés, dont les nuances sont définies dans la norme NF A 35-572, sont toujours du type austénitique à très basse teneur en carbone (moins de 0,03 %) et forte teneur en chrome (18 % environ) et nickel (10 % au moins), nuance Z 2 CN 18-10 (norme américaine AISI 304 L), éventuellement avec adjonction de molybdène, nuance 22 CND 17-13 (AISI 316 L), ou à basse teneur en carbone (< 0,08 %) et stabilisés au titane, nuance Z 8 CNDT 17-12.

Ces aciers tirent leur inoxydabilité de la formation naturelle d'oxyde de chrome par passivation.

Leur découpage s'effectue par les moyens mécaniques habituels ou au plasma, quant au soudage il utilise les procédés classiques de l'acier avec électrode enrobée ou ceux de l'alliage léger MIG ou TIG (**§ B-4 - PAGE 36**).

On trouvera tous les renseignements nécessaires dans la brochure de Cégédur, « *Les aciers et alliages inoxydables* ».

a ▪ Structure des coques en acier

A l'origine la structure des coques en acier, héritière de celles en bois, était presque exclusivement transversale. Des membrures serrées et des porques renforcées constituaient l'ossature sur laquelle venaient s'appliquer les tôles du bordé.

Ce type de structure est toujours celui qui est à la base des règlements des sociétés de classification. S'il est assez bien adapté à la réalisation des coques en forme, il est cher en raison du travail important de formage et de découpe des membrures. Par ailleurs, leur proximité augmente le nombre des déformations que leur orientation perpendiculaire à l'axe rend plus visibles. En contrepartie, il faut reconnaître que, par leur forme, les membrures assurent une meilleure tenue du bordé à la pression, la rigidité longitudinale de la poutre navire étant assurée par le bordé de coque et de pont.

Le désir de réduire le coût de la construction, le développement des coques à bouchains vifs ont conduit à se tourner vers une structure à dominante longitudinale dont les lisses sont supportées à intervalles plus ou moins réguliers par des membrures ou des porques beaucoup plus espacées, selon une disposition qui s'apparente à celle adoptée pour la construction moderne en bois collé. Les lisses n'ont pratiquement pas besoin de formage préalable, elles prennent leur courbure directement sur les couples de structure complétés parfois par des gabarits intermédiaires provisoires.

La construction sur membrures reste la plus utilisée pour les grandes unités en forme bien que, de plus en plus souvent, elle soit complétée par une structure longitudinale dans les parties soumises à des efforts de pression importants, ou lorsque les formes sont très plates.

Dans la majorité des cas, les coques sont construites quille en l'air sur un bâti constitué de solides poutrelles fixées au sol. En construction professionnelle, le pont est très souvent monté en premier sur ce bâti. On évite ainsi de devoir faire « au plafond » les soudures des barrots et surtout celles du livet; les superstructures et cockpits sont généralement plus accessibles et il est facile d'y inclure toutes sortes d'accessoires tels que les gaines de passage des câbles électriques, des goussets ou renforts divers.

b ▪ Échantillonnages

Comme pour la construction en bois, le **TABLEAU 5-III** ne peut être utilisé sans les commentaires suivants qui en sont le complément inséparable.

TABLEAU 5/III
ÉCHANTILLONNAGES DES COQUES EN ACIER

D kg	Bordé	Lisses	Membrures	Fer de quille	Varangues	Pont	Barrots	Lisses de pont
6 000	3	25 x 5	50 x 5	70 x 6	3	2,5	40 x 5	25 x 5
9 000	3-4	30 x 6	60 x 6	80 x 8	4	3	50 x 6	30 x 6
13 000	3-4	40 x 6	80 x 6	100 x 8	4	3	60 x 6	40 x 6
18 000	4-5	40 x 8	80 x 8	120 x 10	5	3	60 x 8	40 x 8
25 000	5-6	50 x 8	100 x 8	150 x 12	6	4	70 x 8	50 x 8

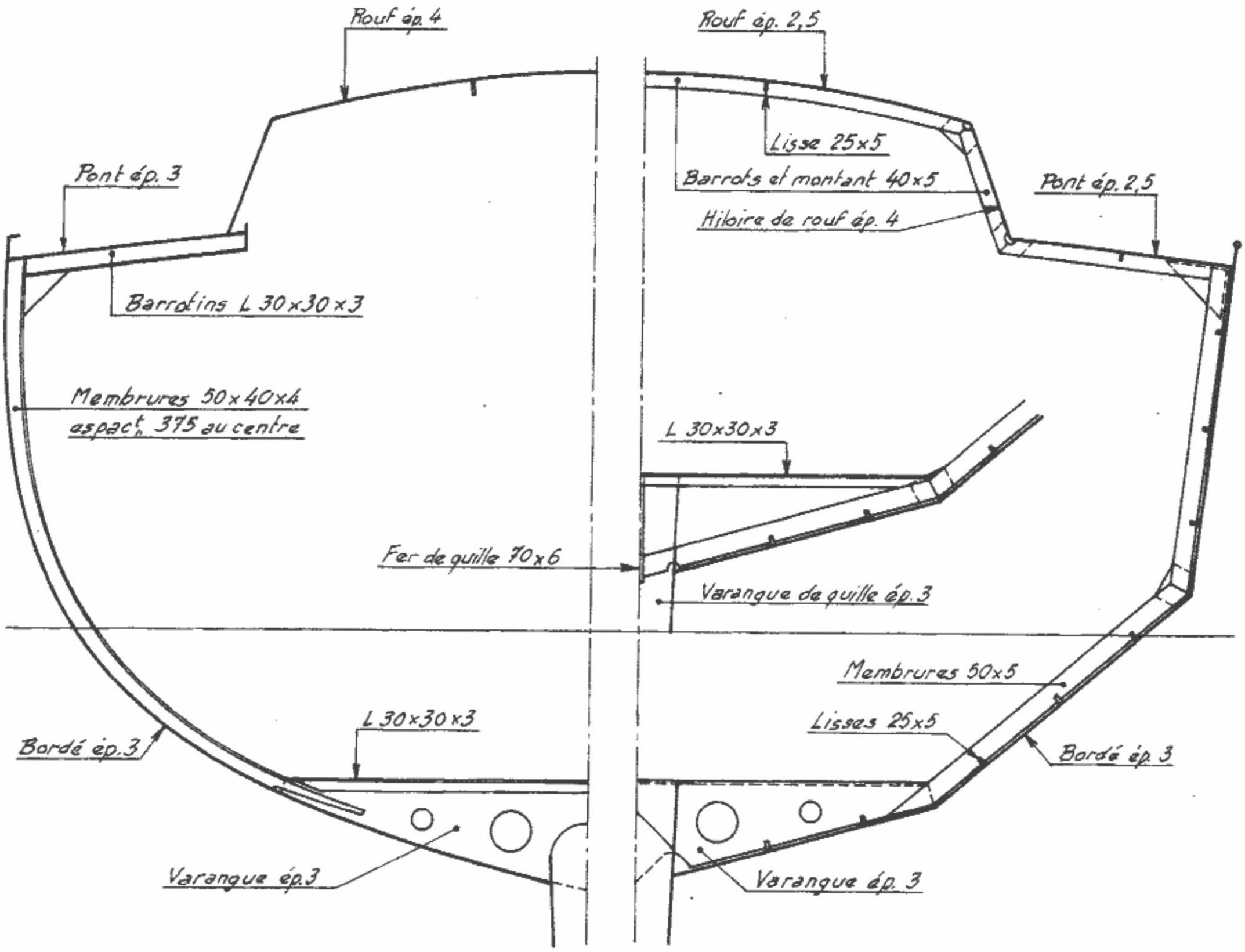


Fig. 5-4 • Deux sections au maître couple pour un croiseur hauturier en acier de 10.50 m et 6.5 à 7 t de déplacement.
À gauche, coque en forme sur membrures. L'épaisseur du rouf en 4 mm permet de supprimer les barrots.
À droite, coque à double bouchains vifs sur lisses, construction simple n'utilisant que des plats. La section complète montre une quille servant de réservoir avec varangue en tôle à bord tombé; le détail du dessus représente une quille ordinaire avec varangue composée.
À noter le recouvrement des éléments de varangue verticaux en arrondi à gauche, et en pointe à droite, pour alléger le cordon de soudure, et les dégagements aux angles du rouf et du pont pour la soudure intérieure.

Il ne s'applique, par ailleurs, qu'à une structure mixte pour des coques à bouchains vifs et représente le minimum pour un acier E 24-2. Pour des coques en forme, de grande taille, on se reportera au règlement du Lloyd.

Bordé : le premier chiffre indique l'épaisseur jusqu'au bouchain supérieur, le second le fond et éventuellement l'inter-bouchain. Pour un dériveur à fond plat, le fond aura une épaisseur triple du bordé des hauts. Il en sera de même pour la semelle des ailerons de quillard. Le bordé de ces ailerons sera de même épaisseur que les fonds. Rappelons, s'il en est besoin, que les bordés de quille ou d'aileron (y compris de gouvernail) doivent impérativement pénétrer dans la coque. Ce sont les bordés de fond qui sont soudés sur ceux de l'aileron et non l'inverse.

En revanche, ils sont partiellement encochés pour laisser le passage des membrures, des varangues et du plat de quille (FIGURE 5-5 A).

Il est toujours possible, et cela est même recommandé par certains et souvent pratiqué en Hollande, de souder les tôles de bouchain non pas directement sur elles-mêmes mais sur un fer rond d'un diamètre au moins égal à 3 fois l'épaisseur de la tôle la plus épaisse.

Cela a l'avantage de matérialiser la ligne de bouchain lors de la découpe et de l'ajustage des tôles et la soudure est plus facile à exécuter... mais le nombre des cordons est doublé et de ce fait les déformations ne sont pas moins importantes.

Si le bordé supérieur constitue un pavois, il sera bordé par le même rond ou par un plat formant bord tombé, de même épaisseur et large de 10 fois celle-ci, s'il est garni d'une lisse en bois. On peut également utiliser un tube.

Le tableau arrière est réalisé dans la même épaisseur que le bordé des hauts et raidi par des lisses et des montants selon sa surface.

Lisses : les dimensions données ici sont celles d'un plat sur chant. Il est bien évident que l'on gagnera du poids en utilisant un T d'épaisseur égale au bordé associé et donnant avec celui-ci un module d'inertie égal. La cornière est à éviter car elle se dévoie lors du cintrage et l'aile, deux fois plus large que celle du T correspondant, gêne pour l'exécution des soudures de son côté. Il y a malheureusement moins de choix de dimensions dans les profils en T que dans les cornières.

Le nombre des lisses, au niveau de la section milieu, dépend de la largeur de chaque panneau de bordé, leur écartement se situera entre 20 et 30 cm. Elles sont soudées au bordé par chenillage.

Membrures : leur espacement se situera entre 0,90 m et 1 m. Ici encore, la dimension donnée est celle d'un plat sur chant et les mêmes considérations que pour les lisses sont à retenir.

Si l'on utilise de la cornière à ailes inégales ou un bord tombé, il sera orienté du côté où l'angle avec le bordé est le plus ouvert (FIGURE 5-5 B).

S'agissant de coques à bouchains vifs, les membrures sont constituées d'éléments rectilignes assemblés par soudure et renforcés par des goussets. La largeur de ceux-ci sera au moins égale à 1,5 fois celle de la membrure et leur épaisseur entre la moitié et les trois quarts de celle-ci (FIGURE 5-5 C) mais on peut aussi avoir des assemblages par recouvrement (FIGURE 5-5 D).

Parfois, le gousset dépasse la membrure vers l'extérieur de façon à pouvoir être ajusté à la demande afin de matérialiser la ligne exacte du bouchain, ce qui est indispensable en particulier si l'on prévoit d'y placer un rond. La membrure constitue généralement un ensemble complet avec le barrot correspondant et les différents éléments nécessaires au soutien ou à la fixation des emménagements.

L'espacement prévu dans ce type de structure est constant quelle que soit la taille de la coque, et de 1 m environ.

Il n'est pas nécessaire que les membrures soient soudées au bordé, on évite ainsi les déformations du bordé perpendiculaires à l'axe de la coque plus visibles et difficiles à masquer. Cela permet aussi d'éviter de leur donner la courbure qui serait indispensable dans les parties avant de la coque du fait de la forme développable des bordés. On se contente simplement de faire varier la profondeur des encoches recevant les lisses.

Dans de nombreux cas, d'ailleurs, ces encoches ne sont pas ajustées en profondeur afin de pouvoir régler au mieux la forme donnée par les lisses.

Si la lisse est en plat, le fond de l'encoche pourra être arrondi. Une petite cale est soudée ensuite en butée. Elle a l'avantage supplémentaire de renforcer la partie de la membrure affaiblie par l'encoche et surtout par les amorces de rupture que ses angles représentent (FIGURE 5-5 E).

En moyenne, l'encoche dans la membrure est égale aux deux tiers de la hauteur de la lisse.

Dans le cas de lisses en T, il n'est pas possible de les ressouder à la membrure sur tout leur pourtour * mais seulement sur le plat de leur aile.

La partie de membrure située en dessous de ces encoches ne sert alors pratiquement plus à rien c'est pourquoi elle sera réduite au minimum (FIGURE 5-5 F). À la limite, il serait préférable de rentrer les membrures sur lesquelles les lisses viendront s'appliquer sans encoche mais cela demande une plus grande précision dans la réalisation et le calage des membrures si l'on ne veut pas être obligé d'interposer une cale, d'épaisseur variable, entre elles et les lisses, lors du réglage.

Pour tenir compte des contraintes de torsion dans la partie centrale de la coque, il serait bon de placer entre les deux un gousset carré sur diagonale, de façon à accroître la longueur des cordons de soudure liant les deux pièces. Ce gousset aura, sur diagonale, trois fois la largeur de la lisse (FIGURE 5-5 G).

Si les membrures servent également à la fixation de cloisons d'emménagements en contreplaqué, on pourra les prévoir plus minces et plus larges afin de bénéficier d'une surface d'appui plus grande et de moins les affaiblir par les trous de fixation.

Le montage de ces cloisons ne s'effectuera qu'après peinture complète de l'intérieur et on prévoira un joint de mastic souple ou de caoutchouc pour laisser une certaine élasticité au montage et rattraper les défauts de planéité de la membrure.

Leur fixation s'effectuera avec des boulons en acier galvanisé à chaud avec une rondelle extra-large côté bois.

A hauteur du mât on prévoira une porque de même épaisseur que la membrure mais 50 % plus large.

Si les cadènes de haubans ne tombent pas à l'aplomb d'une membrure, elles seront fixées sur un gousset ou sur un barrot muni d'un tirant de même section que celui-ci repris sur la lisse ou le bouchain situé à mi-hauteur de franc-bord (FIGURE 5-5 J).

* Bien que j'aie vu une fois un chantier le faire ! On imagine le travail pour découper l'entaille à la forme, y enfiler les lisses et les souder. Il est vrai que c'était avec de l'alliage léger et non de l'acier. Quand même !

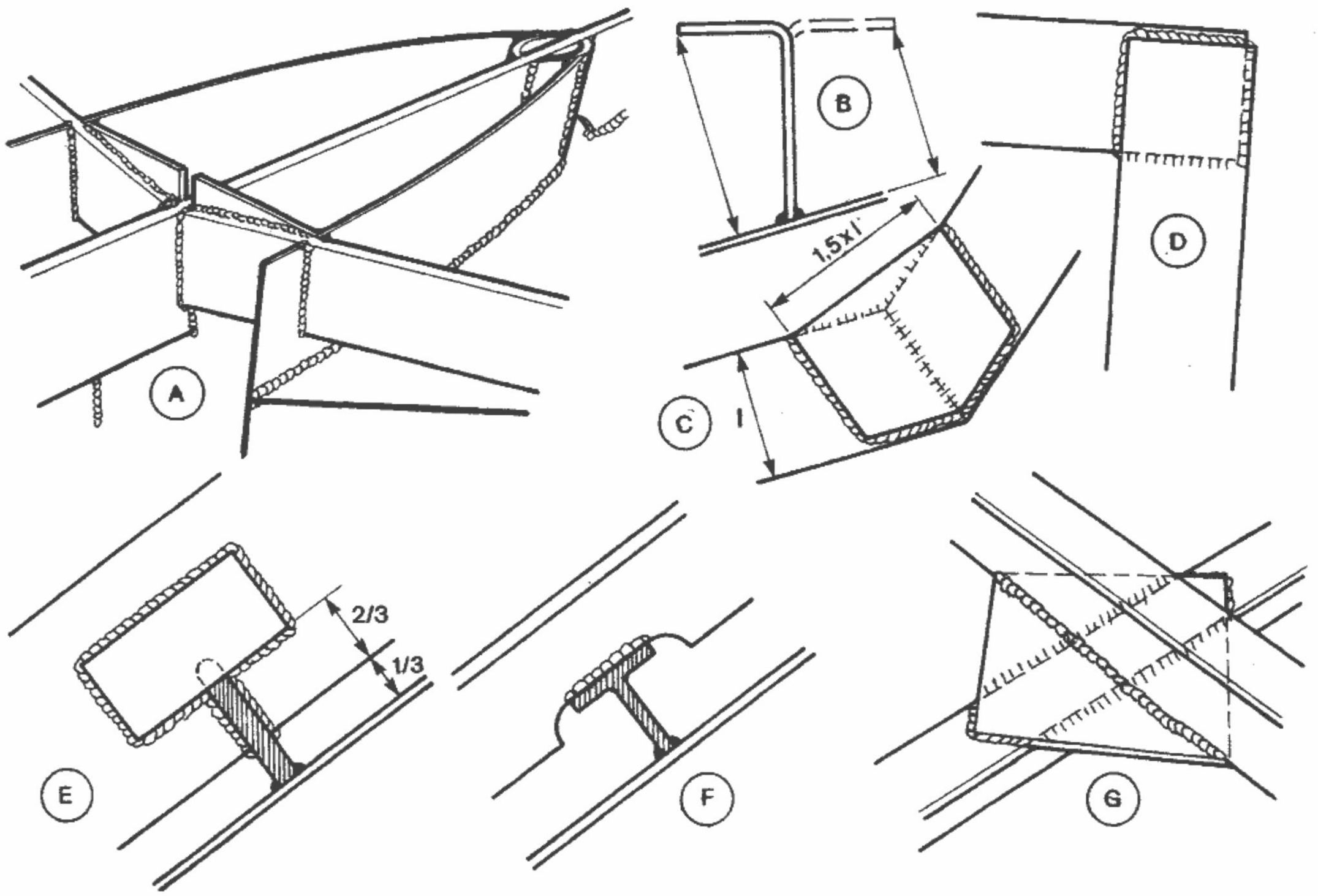


Fig. 5-5 • Quelques détails de construction métallique :
A - Avant d'un aileron de quille ; varangue de quille formant gousset pour les membrures ; dégagement dans le fer de quille à sa traversée du tube avant pour permettre la continuité du cordon intérieur.
B - L'aile d'une varangue du côté ouvert laisse plus de place pour le passage de la baguette.
C - Assemblage d'une membrure par gousset.
D - Assemblage barrot-membrure par recouvrement.
E - Encastrement d'une lisse en fer plat dans une membrure avec cale rapportée.
F - Lisse appuyée sur membrure ; l'encoche dans celle-ci est limitée à ce qui est nécessaire pour l'ajustage, ses angles sont largement arrondis.

Fer de quille : ce fer plat s'étend du sommet de l'étrave jusqu'au tableau arrière. Il peut cependant être interrompu à l'endroit de la quille, les remontées de celle-ci assurant son remplacement.

Au brion, qui relie l'étrave à la quille proprement dite, il est remplacé par une tôle découpée de même épaisseur. Pour éviter des goussets gênants pour la soudure ultérieure du bordé, on renforcera le joint soudé en l'inclinant à 45° par rapport aux plats qui y aboutissent pour augmenter sa longueur (FIGURE 5-5 K).

A son sommet, il constitue lui-même la ferrure d'étai ou est soudé sur une pièce qui en tient lieu, comme au brion. Cette pièce peut être en acier inoxydable si elle constitue un élément de la ferrure d'étrave soumise au ragage de la chaîne d'ancre et des amarres.

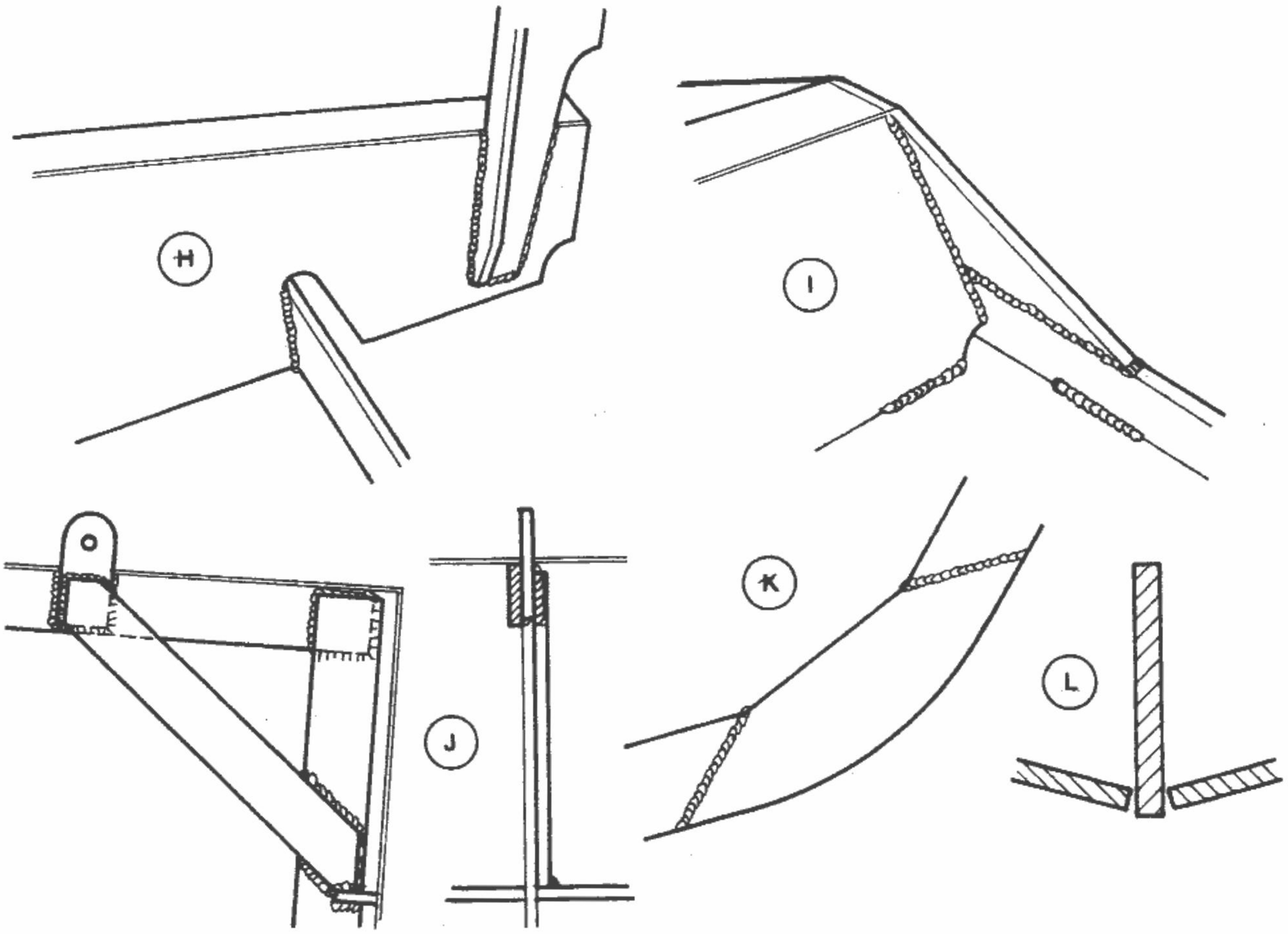
Si l'étrave est constituée d'une tôle roulée conique, son épaisseur sera égale à celle des fonds mais attention aux difficultés du formage du raccordement avec les tôles de fond si le brion est arrondi.

Les tôles des fonds en V ne viennent pas se souder sur, mais contre le fer de quille (FIGURE 5-5 L).

A l'arrière, le fer de quille remonte sur le tableau, son sommet pouvant constituer la cadène de pataras.

L'aileron de quille comporte, sur son bord de fuite, un fer plat de même section que le fer de quille et sur son bord d'attaque, un tube dans lequel celui-ci sera encastré. L'épaisseur de ce tube sera égale à celle du bordé de l'aileron. Si l'aileron est profond ou s'il doit servir de réservoir, il sera souvent nécessaire de diviser son bordé en deux ou trois tôles superposées afin de bénéficier d'une meilleure accessibilité pour les soudures intérieures.

Varangues : elles seront deux fois plus serrées que les membrures. Une sur deux sera donc constituée en partie par la membrure. Elles couvriront une zone du fond comprise entre la membrure située juste en arrière de l'aileron et l'avant de la flottaison. Elles peuvent être constituées soit de plats de même section que les membrures, réunis par une cornière à ailes inégales servant de support au plancher, soit



G - Gousset de renfort entre membrure et lisse appuyée.
H - Varangue et membrure soudées au bordé ; dégagements dans la membrure pour augmenter la largeur du cordon de soudure, dans l'angle de la varangue pour la soudure du bouchain, sur la face extérieure de l'encoche de la lisse pour la libre circulation de l'eau.
I - Gousset de liaison sur lisse en extrémité de varangue.
J - Montage de cadène avec tirant soudé sur la jonction lisse et membrure.
K - Brion.
L - Ajustage du bordé de fond sur le fer de quille.

par une tôle pliée. C'est l'épaisseur de cette tôle qui est donnée dans le tableau, le bord tombé (qui peut être aussi un plat soudé) a une largeur égale à 10 fois l'épaisseur. On prendra les mêmes dimensions pour une cornière.

La partie des varangues qui descend dans l'aileron pour donner à celui-ci sa forme sera rapportée sur la partie horizontale, le bordé de l'aileron étant échancré au-dessus des anguillers, pour en laisser le passage.

La soudure des deux éléments de la varangue se fera par recouvrement en donnant à la découpe des pièces une forme allongeant au maximum les cordons de soudure.

D'autres varangues sont nécessaires en dehors de la zone de lest. Ce sont d'abord celles qui assurent transversalement la tenue des carlingues du moteur. Il ne faut pas oublier que l'ensemble du bâti doit constituer autour du moteur une gatte étanche pour retenir les fuites éventuelles d'huile ou de carburant. Les varangues limitant cette surface devront donc être exceptionnellement soudées au bordé par un cordon continu.

Une varangue sera également nécessaire au droit du presse-étoupe de tube d'étambot ainsi que de la chaise de l'arbre d'hélice.

Enfin, la structure interne de l'aileron de gouvernail, analogue à celle de l'aileron de quille, sera reprise sur des varangues, s'il n'est pas possible de la remonter sur une autre structure transversale telle qu'une cloison ou le fond de cockpit.

Les extrémités des varangues seront toujours arrêtées sur une lisse et non sur le bordé. La hauteur de cette lisse sera éventuellement doublée ou des goussets seront soudés pour assurer la liaison avec le bord tombé et répartir l'effort ponctuel sur une longueur de lisse au moins égale à 6 fois sa hauteur FIGURE 5-5 I.

Pont : sur les voiliers de plus de 20 t, le pourtour du pont est renforcé par une gouttière qui est soit un doublage de la tôle, soit un plat découpé ayant une épaisseur double et une largeur égale à 15 fois cette épaisseur.

Le pont d'une coque en acier peut être réalisé ou revêtu d'un autre matériau. Il peut être en acier inoxydable puisque

nous avons vu qu'il était possible de le souder sur un acier non allié. Cela est intéressant au niveau de l'entretien, mais il faudra éviter toute retenue d'eau et savoir qu'il est à peu près impossible d'y appliquer une peinture ou un revêtement anti-dérapant.

Il peut être en alliage léger, de même que les superstructures, pour gagner du poids dans les hauts, mais de graves problèmes de corrosion sont à craindre que les précautions indiquées au chapitre consacré à ce sujet ne permettront pas toujours d'éviter.

Dans le même but d'allégement, il peut être en contreplaqué plastifié ou recouvert de lattes de teck. Ces dernières peuvent aussi être collées directement sur le pont en acier. Dans les deux cas, la difficulté réside dans la fixation mécanique qui complète le collage et dans son étanchéité à long terme.

Dans le cas du pont en contreplaqué, il semble en effet difficile, à moins qu'il ne soit très épais, d'éviter le perçage de la gouttière et des barrots pour y passer des boulons. Le pont sera posé sur un lit de mastic thiokol ou polyuréthanne souple.

Un joint de même mastic sera placé sous les rondelles de serrage des écrous, à l'intérieur.

Si le pont est assez épais, et en particulier s'il est recouvert de lattes, on pourra souder sur les barrots des goujons espacés d'une distance correspondant à l'entraxe de trois ou quatre lattes, dans l'épaisseur desquelles seront noyés les écrous. Le collage des lattes sur le contreplaqué s'effectue comme sur un bateau en bois (7).

La gouttière aura le double de l'épaisseur du pont en acier et une largeur égale à 15 fois celle-ci. Elle sera encastrée dans les barrots pour conserver la continuité du plan de pose. Toutes les parties métalliques cachées sous le bois recevront au préalable leur traitement anticorrosion complet.

Un pont en acier peut très bien être recouvert de lattes collées. Il existe aujourd'hui des colles polyuréthanne assez souples pour tenir sans problème. La même opération se pratique d'ailleurs sur des ponts en stratifié. La fixation mécanique se fera par des boulons ou des goujons, les têtes ou écrous encastrés dans les lattes étant noyés dans la résine époxyde chargée et recouverts d'un tampon.

Barrots et lisses de pont : le système adopté est généralement mixte avec des barrots correspondant aux membrures et des lisses espacées de 30 à 40 cm. Les échantillonnages du tableau correspondent à cette disposition. Pour d'autres cas, barrots plus serrés par exemple, leur section pourra être réduite dans la proportion du resserrement pour garder un module d'inertie associé au bordé égal.

On peut gagner en hauteur et en poids en remplaçant le plat sur chant par un T, mais il faudra faire attention alors qu'il reste suffisamment de hauteur au fond des encoches des lisses pour que les barrots restent assez rigides avant la pose du pont. On peut, dans ce cas, interrompre les lisses à chaque barrot, mais c'est perdre l'avantage d'un excellent repère pour faire filer le pont. Barrots et lisses seront soudés au pont par un chenillage.

Superstructures et cockpits : les hiloires de rouf seront au moins de la même épaisseur que les bordés des hauts pour tenir compte de l'affaiblissement dû aux ouvertures. Le toit des roufs est échantillonné comme le pont, y compris barrots et lisses.

Si le rouf est monté sur le bateau retourné, les hiloires sont posées sur le pont, alors que lorsque la construction s'effectue quille en l'air à partir du pont, les hiloires sont encastrées dans la découpe de celui-ci, ce qui permet d'y faire aboutir les extrémités des barrotins qui se trouveront ainsi masquées.

Il est souvent tentant avec l'acier, par l'impression de solidité qu'il donne, d'agrandir exagérément les ouvertures des hublots et il ne reste plus qu'un squelette d'hiloire. Il ne faut cependant pas oublier que celles-ci doivent pouvoir supporter la pression totale exercée verticalement sur toute la surface du toit de rouf d'une part, et les contraintes longitudinales de flexion de la poutre navire d'autre part. Bien des problèmes de fixation et de vieillissement prématuré des hublots en acrylique proviennent de l'oubli de cette condition essentielle. Rien n'empêche, cependant, de prévoir de grandes ouvertures, à deux conditions : que les plaques puissent supporter les contraintes de pression, et pour cela il suffit de respecter les épaisseurs définies par la réglementation en vigueur, et surtout de renforcer convenablement les hiloires dans les deux directions de façon à conserver des sections égales à ce qui serait normalement réalisé.

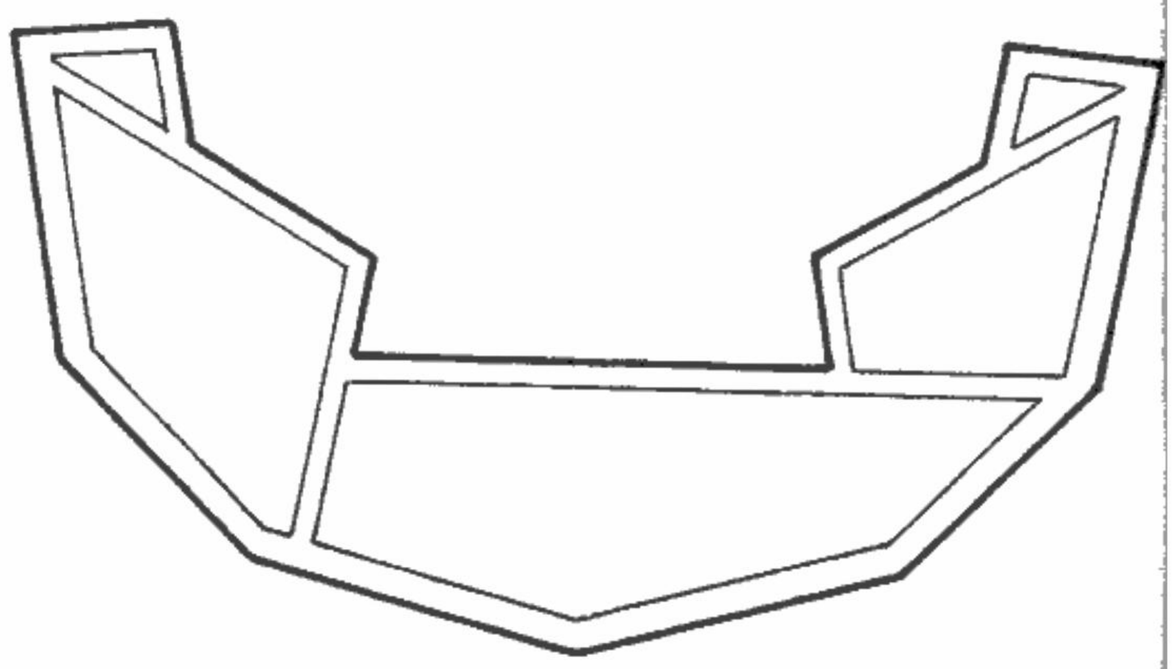


Fig. 5-6 • Montages de cockpit.

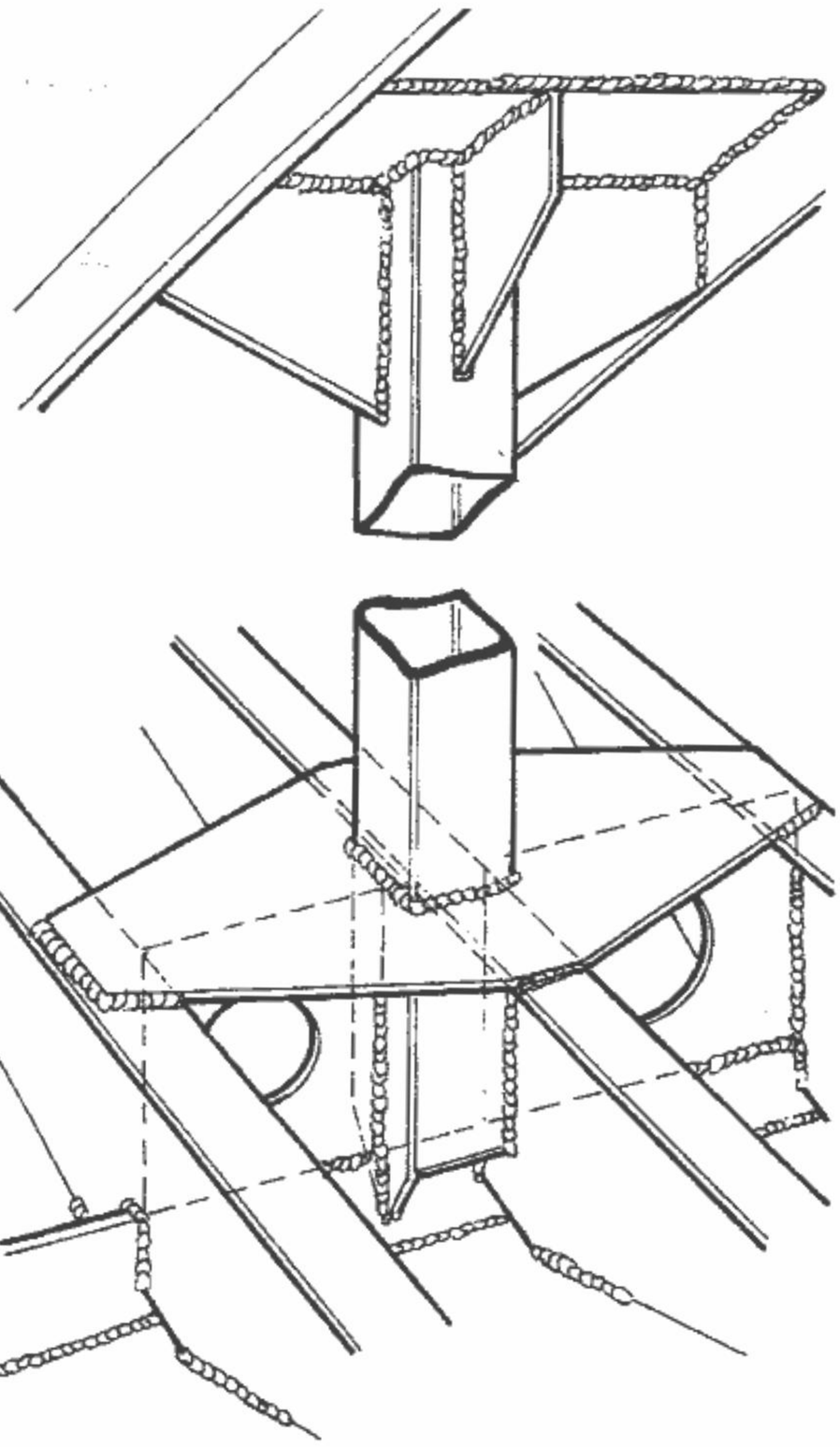


Fig. 5-7 • Montage d'une épontille; le tube carré permet de fixer plus facilement des cloisons.

Dans le sens longitudinal, on pourra obtenir ce renforcement en plaçant dans l'angle du toit de rouf un tube qui offrira, de plus, l'avantage de donner un arrondi à cette arête agressive et, éventuellement, de permettre le passage d'une gaine pour les câbles électriques. A la base, un plat sera soudé à l'extrémité des barrotins. Dans le sens vertical, des U seront soudés sur les montants séparant les hublots.

Sur le toit du rouf, comme sur le pont, les ouvertures seront bordées par un plat, ou une cornière si les barrots sont en T, de même hauteur que ceux-ci. La surface à vaigrer ainsi délimitée sera dans un même plan.

Le fond du cockpit sera supporté par des cornières qui, selon la disposition des emménagements, viendront jusqu'en abord se souder sur les membrures et, dans ce cas, les renforts verticaux s'arrêteront sur ces cornières, soit, et c'est plus généralement le cas, s'arrêteront sur ces renforts verticaux qui, eux, descendront jusqu'aux membrures du fond ou aux varangues (FIGURE 5-6).

Épontille de mât : la quasi totalité des voiliers en acier étant équipés de mâts posés sur le pont pour d'évidentes raisons d'étanchéité, l'épontille de mât y revêt une importance particulière. La section du tube, rond ou carré, aura bien sûr une résistance en compression et au flambage au moins égale à celle du mât mais, de plus, elle devra pouvoir supporter les excentrements dus au décalage du mât nécessaire à son réglage ou même à la simple variation de l'orientation de son effort provoquée par son cintrage.

Si le support du pied de mât ne peut être soutenu que par une seule épontille, celle-ci devra être reprise à son sommet sur les deux barrots adjacents par un solide gousset. Un doublage interne ou externe, courant sur la même longueur répartira les efforts de poinçonnement et, dans le sens transversal, des goussets seront également prévus. A sa base, l'épontille sera reprise sur une varangue laquelle sera reliée par des goussets à ses voisines pour raidir sa paroi verticale et éviter tout flambement (FIGURE 5-7).

Comme avec tous les autres matériaux, si l'extrémité avant de l'aileron tombe en arrière du mât, une structure longitudinale importante devra être prévue pour assurer leur liaison. Celle-ci est également nécessaire dans tous les cas sur des unités dépassant 15 t.

Cloisons étanches : au-dessus de 15 m de longueur hors tout, les navires de plaisance doivent être munis d'une cloison étanche. Sur les voiliers de croisière hauturière, on peut souhaiter diviser la coque en trois ou quatre compartiments (selon la disposition des emménagements) totalement indépendants.

Sur le plan de la conception, cela ne présente pas de difficulté particulière. Il faut simplement définir jusqu'à quelle hauteur on désire que l'étanchéité soit assurée; il n'est pas toujours nécessaire que celle-ci aille jusqu'au pont inclus. S'il en est ainsi, ce qui est le cas pour le compartiment avant, il faudra prévoir, pour le passage des canalisations ou des câbles, des gaines soudées étanches à leurs deux extrémités ou des presse-étoupe. Les accès seront assurés par des portes dans la cloison ou des capots sur le pont, tous deux étanches. Les prises d'eau d'assèchement seront munies d'une vanne à leur sortie de la cloison et les systèmes d'extinction d'incendie, s'il s'agit d'un compartiment moteur ou dans lequel des produits inflammables seraient entreposés, seront obligatoirement à commande à distance.

La cloison elle-même aura la même épaisseur que le bordé et sera renforcée de la même façon.

Il ne faut pas oublier enfin que si, sur le papier, il est facile de décréter qu'une cloison sera étanche, sa réalisation présente bon nombre de difficultés.

Tout ceci fait qu'une cloison étanche coûte cher et que la décision de les multiplier doit être mûrement pesée.

c ▪ Lest et réservoirs dans l'aileron

Lest : la majorité des voiliers en acier ont un lest incorporé à l'aileron ce qui a l'avantage de coûter moins cher et de permettre de le répartir à volonté dans les différents « puits » délimités par ses nervures verticales.

Toutes sortes de matériaux peuvent être utilisés pour cela, mais leur densité **en place** doit être parfaitement définie avec le chantier car elle peut influer de façon sensible sur la hauteur du centre de gravité.

Deux techniques sont utilisables, soit le coulage *in situ* de plomb, soit le bourrage de matériaux de récupération, plomb, acier ou fonte.

Il faudra toujours s'en tenir à l'expérience du chantier et à ses habitudes. Lui imposer une méthode qu'il ne connaît pas est courir à l'aventure. Dans tous les cas, il doit garantir le poids de matériau mis dans la quille.

Une partie du lest, de 5 à 10 % du déplacement, pourra être tenue en réserve pour régler exactement l'assiette du bateau après qu'il a été complètement équipé, mis à l'eau et gréé.

Les recommandations qui suivent touchent essentiellement à la réalisation, mais il est nécessaire que l'architecte connaisse ces problèmes et elles devront souvent figurer à titre de prescription sur le plan ou le descriptif qui l'accompagne, si l'on veut éviter des contestations ultérieures.

Dans tous les cas, l'intérieur de l'aileron devra être sablé et zingué avant l'opération.

Si le lest est coulé *in situ*, il faudra s'assurer que toutes les précautions sont prises pour que l'aileron subisse le minimum de déformation, renforcement extérieur par des cornières provisoires, circulation d'eau, etc. Après refroidissement complet, on colmatera les fissures, qui n'auront pas manqué de se faire entre tôle et plomb du fait du retrait de celui-ci, avec une résine polyester rendue légèrement moussante par adjonction d'un adjuvant (parfois simplement de l'eau).

Si le lest est composé de matériaux de récupération ceux-ci seront déposés en couches successives et bloqués par la même résine. On mélangera des éléments de tailles différentes pour obtenir la plus forte concentration possible de matière. A titre indicatif, je reproduis ci-dessous le tableau donné par Gilbert CAROFF.

Matériau	Densité moyenne obtenue
Plomb fondu	9 à 10
Lingots de plomb	7 à 8
Déchets de plomb	6 à 8
Lingots de plomb déchets d'acier poudre et grenaille d'acier	4 à 6

On constatera que, selon les matériaux, les valeurs vont du simple au double.

Pour obtenir une surface propre, on terminera par un lit de résine chargée bien lissé et formant un large congé dans tous les angles et on stratifiera deux ou trois mats de 300 g/m² pour assurer une étanchéité aussi parfaite que possible. Attention, toutes les résines ne tiennent pas sur le métal et il est souvent nécessaire d'assurer leur prise par un primaire spécial. La même opération de stratification doit être faite sur un lest en plomb coulé *in situ*.

Réservoirs : le lest n'occupant qu'une partie du volume de l'aileron, il est tentant d'utiliser le reste pour réaliser des réservoirs d'eau douce ou usée, ou de carburant, le poids de ces liquides se trouvant ainsi placé à une hauteur favorable à la stabilité. Cela est possible, bien que toujours délicat et un certain nombre de conditions doivent être respectées.

On n'utilisera jamais les tranches avant et arrière de l'aileron en raison des difficultés de soudure intérieure dans ces extrémités étroites.

Si plusieurs réservoirs doivent recevoir des liquides différents, ils seront impérativement séparés par une tranche étanche et vide, ou *cofferdam*, afin de réduire les risques de contamination par infiltration. Il en sera de même pour un réservoir d'eau douce jouxtant un lest en plomb. Pour la même raison, le fond des réservoirs ne sera jamais constitué par la semelle de l'aileron mais par une tôle ménageant un *cofferdam*.

A la base du réservoir, un robinet de vidange donnera sur un puisard dont le fond sera plus bas que le sien.

Si le réservoir occupe plusieurs tranches de l'aileron, des ouvertures et des anguillers seront ménagés pour le passage du liquide.

La tape qui ferme le dessus du réservoir sera boulonnée sur une cornière ou un plat soudé à **l'extérieur** du pourtour de la cuve. On conserve ainsi le total accès aux parois pour leur peinture et leur nettoyage. Pour la même raison, les arrivées et prises diverses seront fixées sur la tape boulonnée et non sur le pourtour du réservoir. Il est également plus facile ainsi d'assurer leur étanchéité. Celle de la tape sera réalisée par un joint de néoprène (FIGURE 5-8).

Les réservoirs devront être protégés par un revêtement adapté : résistant aux hydrocarbures pour le carburant (ne jamais zinguer un réservoir à gazole), alimentaire pour l'eau douce. Tous les angles seront arrondis par un large congé de résine chargée (polyuréthanne ou époxyde + silice ou microbilles par exemple) avant l'application du revêtement, ceci afin d'éliminer tous les recoins qui seraient impossibles à nettoyer correctement.

Ces revêtements seront appliqués en finition après les peintures normales de protection du métal.

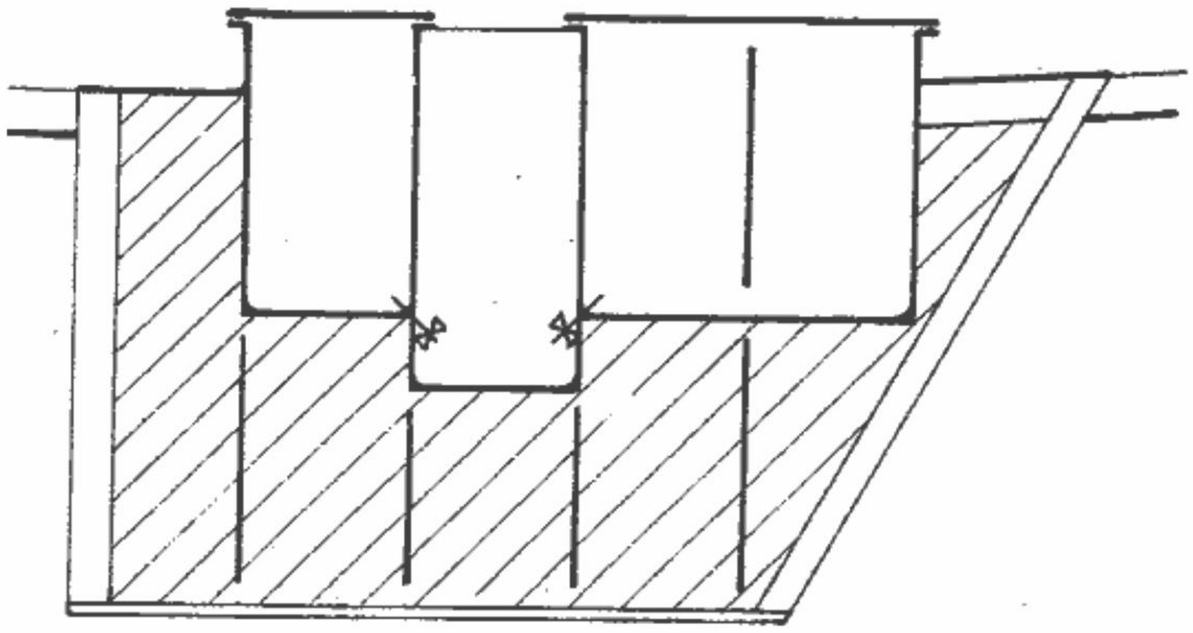


Fig. 5-8 • Aileron avec réservoirs incorporés, eau à l'avant, vide au milieu, gazole à l'arrière. Les différents compartiments du lest communiquent par des ouvertures en haut et en bas des cloisons pour permettre au plomb fondu de se répartir et à l'air de s'échapper ; les fonds des réservoirs doivent être étanches pour éviter au plomb de remonter. Attention la pression est très forte ; on réservera les parties hautes avant et arrière du lest pour l'ajustage de l'assiette après la mise à l'eau.

2 L'ALLIAGE LÉGER

Les alliages utilisés en construction navale sont peu nombreux, de trois familles seulement : les alliages à base de magnésium et manganèse baptisés A-G, les alliages à base de magnésium et silicium, les A-GS, et les alliages à base de magnésium, silicium et manganèse les A-SGM.

Seuls les deux premiers sont utilisés pour la réalisation des coques, les seconds n'étant disponibles qu'en profilés. Les derniers, qui ont à peu près les mêmes caractéristiques mécaniques que les premiers, mais une moins bonne résistance à la corrosion marine, ne sont utilisés que pour des profilés qui peuvent être anodisés, et en particulier les mâts. De plus, A-GS et A-SGM sont des alliages à durcissement structural par traitement thermique donc plus affectés par les opérations de soudage.

La désignation des alliages d'aluminium est définie par les normes NF A 02-104 et A 50-451 dans un système à quatre chiffres, le premier désignant le groupe d'alliage. Ce sera un numéro 5000 pour les alliages de magnésium (A-G) et 6000 pour les alliages de magnésium et silicium (A-GS et A-SGM). Les trois autres chiffres correspondent à un numéro d'enregistrement.

L'état du produit livré, indiquant les opérations que le métal de base a subies, est défini par la norme NF A 02-106.

Pour les alliages sans traitement thermique, l'état est désigné par les lettres F, O ou H suivies de deux chiffres.
F = état tel que fabriqué ;
O = état recuit ou recristallisé ;
H = état écroui par une opération de travail à froid.

Le premier chiffre est une subdivision de l'état H :
H 1 = écrouissage seul par travail à froid ;
H 2 = écrouissage suivi d'un recuit de restauration ;
H 3 = écrouissage suivi d'une stabilisation.

Le second (et parfois le troisième) chiffre définit la nuance :
1 = doux ;
2 = 1/4 dur ;
3 = l/2 dur.

Les tôles et profilés en A-G que nous utiliserons le plus souvent seront ainsi définis par l'état H 111.

Pour les alliages à traitement thermique, l'état est désigné par la lettre T suivie d'un chiffre désignant le type de traitement. Pour les mâts en A-SGM par exemple, l'état T 6 indique une mise en solution suivie d'une trempe et d'un revenu. Les profilés en A-GS sont généralement livrés en l'état T 5 (seulement revenu).

Le TABLEAU 4-V - TOME 2 - PAGE 104 donne les caractéristiques des principaux alliages utilisés. Les normes NF A 50-411 pour les produits filés et étirés et A 50-451 pour les produits laminés en définissent les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques.

Il est important de rappeler que celles-ci peuvent varier dans des proportions extrêmement importantes au niveau de la limite élastique, en fonction de l'état du métal. Ainsi une tôle d'A-G 4,5 MC 5083 verra sa limite élastique passer de 12,5 daN/mm² à l'état H 111 (recuit plané) à 27 daN/mm² à l'état H 34 (écrouissage suivi d'une stabilisation, en nuance 1/2 dur). Le même métal verra sa limite élastique retomber à 13 daN/mm³ au voisinage des soudures qui auront eu pour effet de le ramener à l'état H 115.

Il faut donc, lorsqu'on calcule une structure, ne pas oublier de tenir compte du mode d'assemblage ou d'usinage pour choisir les bonnes caractéristiques. C'est pourquoi on utilise le collage et (ou) le rivetage dès qu'il est indispensable de conserver les caractéristiques optimums du métal. Car il n'est pas possible de faire subir à une coque entière les traitements mécaniques et thermiques qui permettraient au métal de retrouver ses qualités initiales.

Par ailleurs, il est évident que plus le métal sera d'une nuance douce, plus il sera facile à former et il ne faut pas oublier que toute opération de formage provoque un écrouissage qui remonte la limite élastique.

Comme tous les alliages, ceux d'aluminium sont sensibles à la fatigue et ce d'autant plus que leur formulation est plus complexe et leurs caractéristiques plus élevées.

LES TRAITEMENTS DE L'ALLIAGE LÉGER

IL me semble utile de donner quelques détails sur les traitements des alliages d'aluminium tels que définis par la norme NF A 02-011 car ils ont parfois des effets différents de ce que l'on a l'habitude de connaître pour l'acier.

Les **alliages sans traitement thermique** (série 5000) ne voient leurs caractéristiques modifiées que par l'écrouissage dû aux déformations à froid : laminage, formage. Cependant les tensions internes résultant de ces opérations doivent être éliminées soit par des traitements mécaniques (étirage), soit par des traitements thermiques, tels que le **recuit de restauration** qui s'effectue à une température relativement basse (environ 400°C). La **stabilisation** est réservée plutôt à des alliages spéciaux destinés à travailler à haute température pour éviter de trop grandes variations dimensionnelles.

Les **alliages à traitement thermique** (série 6000) voient leurs caractéristiques modifiées soit par écrouissage, soit par traitement thermique, soit plus souvent par une combinaison des deux.

Le traitement mécanique est généralement soit un étirage destiné à dresser les profilés sortant de filière, soit un écrouissage pour les tôles.

Le traitement thermique peut être soit un recuit, soit une trempe suivie d'une maturation ou d'un revenu.

Le **recuit** s'effectue sur une durée plus importante que pour les alliages de la série 5000 et selon un cycle de montée et de descente en température bien précis.

Il modifie la structure cristalline du métal. Celui-ci en sort avec des caractéristiques mécaniques minimales.

La **trempe** comporte également une montée en température contrôlée aux environs de 500°C, qui provoque la mise en solution solide d'un ou plusieurs composés. Un refroidissement brusque est alors effectué dans un fluide approprié (eau à diverses températures, huile, air ou brouillard).

Contrairement à l'acier, à la fin de la trempe, le métal possède des caractéristiques minimums sensiblement égales à celles du recuit. Celles-ci ne remonteront qu'au bout d'un temps de **maturation** de quelques jours à la température ambiante. On peut accélérer celle-ci et la réduire à quelques heures par un **revenu** à une température généralement inférieure à 200°C. C'est à la suite du revenu que le métal atteint ses caractéristiques mécaniques les plus élevées.

On conçoit que toutes ces opérations ne puissent s'effectuer que dans des fours où la température est soigneusement régulée en valeur et en durée et ne peuvent donc malheureusement s'appliquer à une coque terminée ! Seul un recuit de restauration pourra être effectué au chalumeau sur les zones affectées par les soudures ou par le formage pour réduire les tensions internes qu'ils auront provoquées. ■

Nous l'avons déjà signalé à propos du bosselage des tôles de bordé, mais parfois le phénomène peut être plus grave et conduire à la **rupture fragile** lorsque des tensions internes, ou des corrosions intercristallines, viennent s'ajouter aux contraintes alternées.

Plus l'écart entre résistance à la rupture et limite élastique sera élevé, moins l'alliage sera sensible à la fatigue. Cela montre aussi l'intérêt du traitement thermique des zones soudées.

Les dimensions recommandées et les tolérances des produits les plus couramment utilisés sont données dans les normes NF suivantes :

A 50-702 : barres de section circulaire filées ;
A 50-703 : barres de section carrée filées ;
A 50-705 : méplats filés ;
A 50-706 : profilés de section simple filés en forme de L (cornières à ailes égales et inégales) ;
A 50-707 : profilés de section simple filés en forme de I ;
A 50-708 : profilés de section simple filés en forme de T ;
A 50-709 : profilés de section simple filés en forme de U ;
A 50-710 : profilés de section quelconque filés (uniquement tolérances) ;
A 50-711 : tubes de section circulaire filés, livrés en longueurs droites ;
A 50-731 : barres de section circulaire étirées ;
A 50-732 : barres de section carrée étirées ;
A 50-734 : méplats étirés ;
A 50-737 : tubes de section circulaire étirés ;
A 50-738 : tubes de section carrée et rectangulaire étirés ;
A 50-751 : tôles ;
A 50-801 : tubes soudés de section circulaire ;
A 50-805 : tubes soudés de section carrée et rectangulaire.

Recueil de normes

Métaux non ferreux.
Tome 1 - *Produits en aluminium et alliages d'aluminium. Caractéristiques et dimensions.*
A 65-700 - *Le magnésium et ses alliages. Caractéristiques, mise en œuvre, applications.*

Ces documents sont fort utiles car ils donnent toutes les valeurs des masses linéiques, des sections, des moments et des modules d'inertie.

Mais attention, les dimensions recommandées sont loin de figurer toutes aux catalogues des fournisseurs. Il est donc indispensable de se procurer ceux-ci.

Les fournisseurs fabriquant ou livrant en France sont :
Péchiney Aluminium, Tour Manhattan, La Défense II, cedex 21, 92087 Paris-la-Défense.
Alusuisse, 55, Rue Aristide Briand, 92300 Levallois-Perret.
La société Alluminio Italia, piazza G. Marconi 25 - Rome, a créé des profilés en T et L à ailes inégales en largeur et

en épaisseur particulièrement adaptés à la construction de plaisance.

On peut obtenir des informations techniques auprès du Centre de Recherche et Développement d'Aluminium Péchiney, Parc économique Centr'Alp, 725, Rue Aristide Bergès - 38340 Voreppe.

Sauf pour les cas cités plus haut, la majorité des voiliers actuels sont assemblés par soudure. Mais cette fois, contrairement à l'acier, cette soudure ne peut s'effectuer que sous atmosphère de gaz neutre, hélium, argon ou mélange des deux.

Deux procédés sont utilisés. Le procédé T.I.G. (*tungsten inert gas*) dans lequel l'électrode est réfractaire, le métal d'apport étant sous forme de baguette tenue à la main, et le procédé M.I.G. (*metal inert gas*) dans lequel le métal d'apport constitue une électrode fusible.

Le choix de l'un ou l'autre procédé dépend essentiellement de l'épaisseur de la tôle à souder.

Dans les conditions habituelles, le procédé T.I.G. ne peut être utilisé en soudure manuelle pour des tôles de plus de 4 mm, tandis que le procédé M.I.G. ne peut l'être pour des tôles de moins de 3 mm. Entre les deux, le choix dépendra de l'expérience du chantier et de la qualification de ses soudeurs.

Il n'est pas question ici d'entrer dans le détail des équipements et des méthodes de soudure, les publications de l'I.F.T.A. * vous fourniront tous les renseignements nécessaires, mais il faut noter que la torche qui remplace la pince du soudeur d'acier est nettement plus encombrante, surtout dans le procédé M.I.G. où elle comporte, en plus des arrivées de courant, de gaz et du circuit d'eau de refroidissement communs aux deux procédés, la gaine d'arrivée du fil d'apport et son système d'entraînement. Avec le procédé T.I.G., il faut tenir compte en plus de l'encombrement de la main tenant la baguette. Il est donc encore plus important qu'avec l'acier de prévoir les dégagements nécessaires.

Au niveau du chantier, des précautions toutes particulières doivent être prises dans la précision de l'approche des tôles, leur préparation et la propreté; poussières, graisses, humidité, courants d'air sont à proscrire pour éviter une grande partie des défauts des soudures.

L'aspect et la tenue d'un chantier construisant en alliage léger n'ont rien à voir avec ceux d'un chantier construisant en acier. Ils vous donneront tout de suite une idée de sa qualification.

En dehors des conditions particulières de leur mise en œuvre, les soudures réalisées sur l'alliage léger sont les mêmes que sur l'acier : cordon continu en une ou plusieurs passes, chenillage, bouchons.

* Institut Français des Techniques de l'Aluminium, Tour Manhattan, 92087 Paris-la-Défense cedex.

Pour ces derniers, l'I.F.T.A. préconise des lumières séparées par une distance supérieure ou égale à trois fois leur longueur.

Les défauts des soudures et leur contrôle sont pratiquement les mêmes que pour l'acier.

a ▪ Structure des coques en alliage léger

La construction en alliage léger étant héritière à la fois de la construction navale en acier et de la construction aéronautique, la structure adoptée pour la réalisation des coques a pratiquement toujours été mixte sur membrures et lisses.

Il faut rappeler cependant que les membrures permettent un gain de poids qui conduit un chantier comme Huisman, en Hollande, à adopter une structure sur membrures resserrées (environ 30 cm) sur les deux tiers arrière de ses coques, les lisses n'apparaissant que dans le tiers avant.

Elle diffère donc assez peu de celle des coques modernes en acier, si ce n'est un resserrement des membrures de façon à ne pas dépasser une surface libre des panneaux de bordé d'environ un quart de mètre carré. Pour la même raison, les membrures et varangues sont presque toujours soudées au bordé. Les lisses étant en T ou en cornières, leurs encoches doivent être largement arrondies dans les angles pour éviter des amorces de rupture.

Comme les coques en acier, celles en alliage léger sont construites la plupart du temps quille en l'air avec le pont pour base. De plus, du fait de la légèreté et de la précision plus grande à laquelle sont habitués les chantiers, de nombreux éléments séparés peuvent être préfabriqués.

b ▪ Échantillonnages

Le TABLEAU **5-IV** appelle à peu près les mêmes observations que pour la construction en acier.

Les échantillonnages sont donnés pour des coques en forme, en alliage A-G 4,5 MC 5083 H 111 pour le bordé et en alliage identique ou A-GS 6060 T 5 pour les profilés.

Bordé : l'épaisseur de ceux-ci est un minimum, compte tenu de l'espacement des lisses et membrures. En construction en alliage léger, on n'hésite pas à utiliser plusieurs tôles d'épaisseur décroissante, parfois jusqu'à 5 ou 6 dans les très grosses unités. L'épaisseur sera doublée pour le fond d'un dériveur intégral, de même que pour une semelle d'aileron.

Lisses : leur section est en cornière ou plus souvent en T. Sur un bateau à bouchains vifs, chacun de ceux-ci est compté pour une lisse, sauf dans le tiers avant.

Membrures : elles sont en cornière ou en T à ailes inégales. La profondeur de l'encoche des lisses ne devant pas dépasser la moitié de la hauteur de la membrure indiquée,

TABLEAU 5/IV
ÉCHANTILLONNAGES DES COQUES EN ALLIAGE LÉGER

D kg	Bordé	Lisses	E	Membrures	E	Fer de quille	Varangues	Pont	Barrots	Lisses de pont
1 500	3-4	30 x 30 x 3	200	40 x 30 x 3	1 000	60 x 8	4	3	30 x 30 x 3	25 x 25 x 2,5
3 500	4-5	40 x 40 x 4	250	50 x 30 x 4	900	80 x 10	5	4	40 x 40 x 3	30 x 30 x 3
6 000	4-6	40 x 40 x 4	250	50 x 30 x 4	800	80 x 12	6	4	40 x 40 x 4	30 x 30 x 3
9 000	4-5-6	50 x 50 x 4	300	60 x 40 x 4	700	100 x 12	6	4	50 x 50 x 4	40 x 40 x 3
13 000	5-6-8	50 x 50 x 5	340	60 x 40 x 5	600	120 x 15	8	5	50 x 50 x 5	40 x 40 x 4
18 000	5-6-8	50 x 50 x 5	370	80 x 50 x 6	500	160 x 15	8	5	60 x 60 x 6	40 x 40 x 4
25 000	6-8-10	50 x 50 x 5	400	100 x 50 x 6	450	160 x 20	10	6	80 x 50 x 6	40 x 40 x 4

celle-ci devra être augmentée en conséquence lorsque la membrure vient s'appuyer sur le bordé.

Au niveau du mât et de l'arrière du rouf, une ou plusieurs porques auront une largeur et une hauteur augmentées de 50% et une épaisseur double. Ces porques sont généralement en tôle découpée et rebordées d'un plat soudé formant L ou T.

Si les lisses ne sont pas encastrées dans les membrures, on donnera à celles-ci la même section ; vérifier le module d'inertie avec le bordé associé. De même si l'on fait varier l'écartement des lisses ou des membrures.

Fer de quille : mêmes remarques que pour l'acier, mais on mettra souvent à profit la plus grande facilité d'usinage pour donner aux pièces des formes qui se raccordent plus en douceur.

Varangues : elles seront deux fois plus serrées que les membrures dans la zone du lest et le tiers avant avec un minimum d'environ 0,40 m. Elles seront généralement constituées d'une tôle servant de gousset aux membrures et dont le bord supérieur est replié sur la même largeur que celles-ci. Elles pourront être largement ajourées. Sur les voiliers de plus de 10 t, un carlingage complétera la structure longitudinale depuis deux ou trois membrures en avant du pied de mât ou de l'épontille jusqu'à une distance égale en arrière de l'aileron de quille.

Pont : mêmes remarques que pour l'acier.

Barrots : ils seront en cornière, comme les membrures, ou en T.

Lisses de pont : elles sont en T et respectent l'écartement des lisses de coque.

Superstructures et cockpits : les hiloires de rouf sont de la même épaisseur que le pont avec des renforts adéquats pour compenser les ouvertures de hublots.

c ▪ Lest et réservoirs

Lest : il peut être extérieur ou intérieur à l'aileron ; dans les deux cas, il faudra veiller tout particulièrement aux risques de corrosion. D'autre part, la coulée du plomb dans un aileron en alliage léger est beaucoup plus délicate que dans un aileron en acier du fait de la moindre différence des températures de fusion des deux métaux et des conséquences que ce « traitement thermique » aura sur la structure de la tôle. Renforcement et refroidissement énergique par circulation d'eau sont indispensables.

Il ne faut pas non plus négliger les problèmes de corrosion qui pourraient résulter ultérieurement de la proximité de ces deux métaux. Seuls les chantiers ayant une grande expérience de cette technique peuvent s'y risquer.

Il sera souvent plus sûr de sceller en place des lingots, éventuellement coulés à la forme, qui pourront ainsi être parfaitement isolés de la tôle par la résine de scellement.

La fixation d'un lest extérieur doit également être parfaitement isolée par un joint étanche entre la semelle et le fond et par des bagues et rondelles en polyamide autour du boulon et sous la rondelle de serrage de l'écrou. Une cuvette soudée autour de l'écrou permettra de noyer celui-ci dans une résine qui l'isolera des eaux pouvant stagner dans les fonds (FIGURE 5-9).

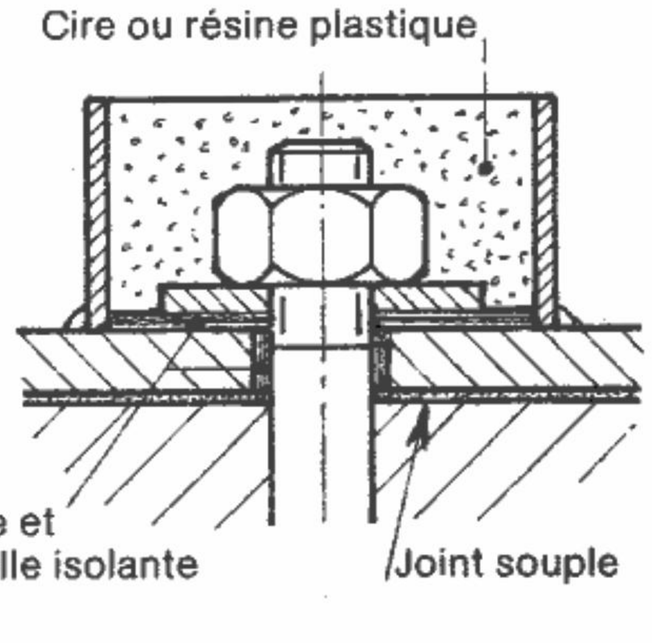


Fig. 5-9 • Montage de boulon de quille isolé ; le remplissage de la cuvette se fera de préférence avec une cire ou du brai qui pourra fondre pour dégager l'écrou.

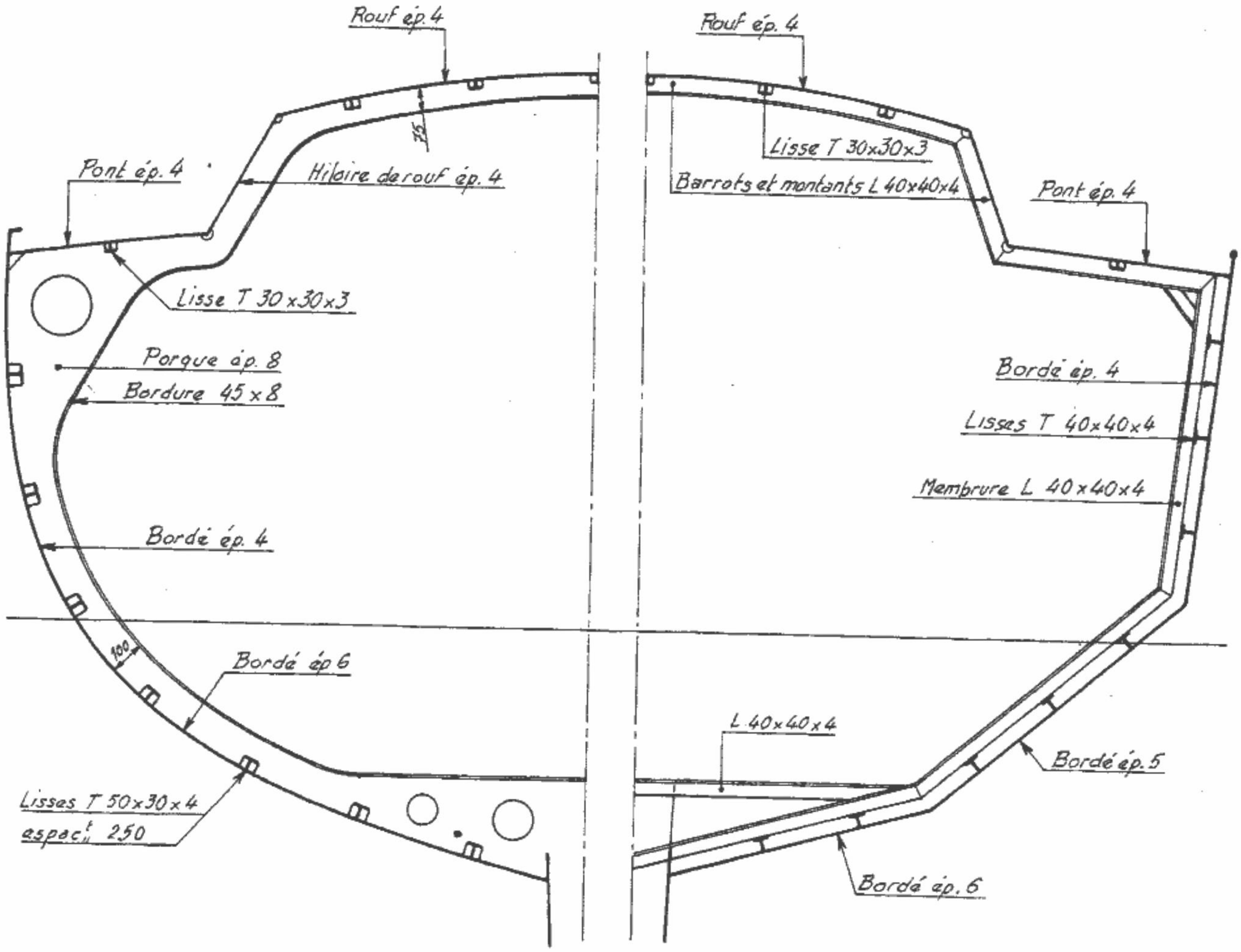


Fig. 5-10 • Deux sections pour un croiseur hauturier en alliage léger de 10.50 m et 6.5 à 7 t de déplacement.
A gauche, porque soudée au bordé sur une coque en forme.
A droite, coque à bouchains vifs avec lisses appuyées sur les membrures. Compte tenu du renforcement des joints de leurs différents éléments, apporté par la présence de l'aile des cornières, les goussets ne sont pas indispensables; on a néanmoins conservé une entretoise dans l'angle du livet.

Réservoirs : l'alliage léger convient parfaitement à la réalisation de tous les réservoirs. Il sera cependant indispensable de veiller à ce qu'aucune pièce en métal autre qu'un alliage d'aluminium compatible n'entre dans la constitution des circuits d'eau, embouts, canalisations, vannes, etc.

Les canalisations rigides seront en tube d'A-G 4 MC, les embouts, prises ou vannes en polyamide.

S'il n'est guère possible d'éliminer totalement des pièces en alliage cuivreux on disposera, dans le circuit, à proximité de celles-ci, des anodes sacrificielles en zinc.

Les réservoirs d'eau potable doivent être revêtus d'une peinture alimentaire si l'on veut éviter qu'elle prenne un goût de métal.

3 AUTRES MATÉRIAUX

La construction navale de plaisance utilise d'autres métaux que les aciers et alliages légers, en particulier pour des pièces mécaniques ou d'accastillage. Les plus anciens sont à base de cuivre : bronzes (cuivre et étain), bronze d'aluminium et cupronickel. Mais, pour de hautes performances, on utilise aussi les alliages de titane pour leur faible densité, leur résistance à la traction très élevée et leur bonne tenue à l'eau de mer.

Cependant, leur coût (environ 10 fois celui des meilleurs aciers inoxydables) et leur difficulté d'usinage les réservent à des cas particuliers.

4 CORROSION ET PROTECTION DES MÉTAUX

Dès lors qu'il aborde la construction métallique, l'un des principaux soucis de l'architecte doit être la prévention de la corrosion. Mais l'on aurait tort de croire que les coques construites en d'autres matériaux puissent l'ignorer, car elles comportent toutes des pièces métalliques, hélice et son arbre, ferrures de gouvernail, vannes de coque, etc., soumises aux mêmes attaques de l'environnement.

Depuis la coque en bois classique qui perd ses bordés parce que les rivets en cuivre y voisinent avec des clous galvanisés ou la coque en plastique qui coule au mouillage parce que la masse du radiotéléphone branchée sur la prise d'eau du moteur est de polarité inverse de celle de celui-ci, les exemples ne manquent pas qui concernent tous les bateaux.

Du fait de son environnement, tout élément métallique d'un bateau est soumis à une attaque dont l'ampleur est inconnue à terre. En comprendre les causes pour mieux la combattre est le premier pas vers la solution.

La corrosion en général est un phénomène de dissolution du métal dans son environnement. Elle peut avoir deux origines, chimique ou électrochimique (**18**).

a ▪ Corrosion chimique

La corrosion chimique est le résultat de l'attaque directe du métal par des acides, des bases ou des agents organiques. On peut observer également une corrosion d'origine biochimique imputable à des bactéries en suspension dans l'eau.

Les alliages légers et les aciers inoxydables utilisés en construction navale ont une bonne résistance à la plupart des produits chimiques ou organiques courants en présence desquels ils peuvent être mis.

b ▪ Corrosion électrochimique

Avec la corrosion par l'oxygène, ou oxydation, on aborde les processus électrochimiques.

Ainsi la formation de la rouille en milieu humide sur l'acier est un phénomène d'oxydation complexe dans lequel interviennent des phénomènes électrochimiques conduisant à la formation d'hydroxyde ferreux, puis d'oxyde ferrique qui s'auto-entretiennent et conduisent à la conversion totale du métal en oxyde, c'est-à-dire son retour à sa forme originelle.

• Corrosion galvanique

La plupart du temps, le processus de corrosion s'établira à partir de phénomènes électrochimiques, ou autocorrosion, plus directs, que nous allons tenter d'expliquer aussi clairement que possible, ce qui n'est pas simple.

Si l'on met en présence, dans un même électrolyte (solution de sels divers dans de l'eau), deux métaux, nous avons constitué une pile électrique. Tant qu'il n'y a aucun contact entre les deux électrodes réalisées par ces métaux, il ne se passe rien (ou presque, n'oublions pas « la pile qui ne s'use que si l'on s'en sert »). En revanche, si l'on établit une liaison conductrice — entre les deux électrodes — un courant électrique va circuler entre elles. C'est ce que nous faisons en fermant l'interrupteur de notre lampe de poche, le courant passe par l'interrupteur et le filament de la lampe lequel, échauffé par la résistance qu'il oppose au passage de ce courant, va émettre de la chaleur et de la lumière. A ce moment, la pile commence à « s'user » et, si elle s'use, c'est comme le mot l'indique parce que l'un des deux constituants de la pile va se dissoudre progressivement. Notons au passage que nous pouvons remplacer la lampe par un voltmètre ou un ampèremètre et mesurer la différence de potentiel entre les deux électrodes ou l'intensité du courant électrique ainsi produit.

Si nous étions capables de « voir » les atomes des métaux en présence et leurs particules élémentaires, nous assisterions à la chose suivante.

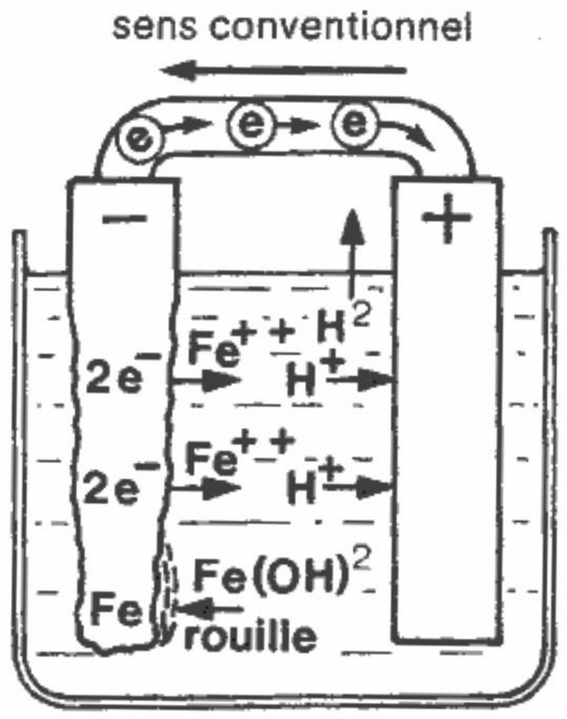


Fig. 5-11 • Corrosion galvanique de l'acier en présence d'un métal plus noble ; les ions ferriques **Fe⁺⁺** se détachent pour rejoindre le métal plus noble de la cathode, tandis que les électrons libérés **e** se combinent, au niveau de celle-ci, avec les ions hydrogène **H⁺** de l'électrolyte pour libérer de l'hydrogène gazeux H_2. De son côté, l'hydroxyde ferreux **Fe (OH)$_2$** est oxydé par l'oxygène contenu dans l'eau et donne de l'oxyde ferrique $F_2 O_3$, c'est la rouille.

TABLEAU 5/V

TABLE DES POTENTIELS DE DISSOLUTION

dans l'eau de mer naturelle en mouvement à 25° C.

- 1,60	Magnésium
- 1,13	Acier galvanisé à chaud
- 1,13	Zinc
- 0,84-0,87	Alliages aluminium magnésium (série 5 000)
- 0,82	Aluminium à 99,99 %
- 0,80-0,83	Alliages aluminium magnésium et silicium (série 6000)
- 0,61	Acier doux
- 0,59 à 0,61	Fontes
- 0,53	Acier inoxydable au chrome nickel Z2 CN 18.10 (actif)
- 0,51	Plomb
- 0,40	Laiton
- 0,36	Cuivre
- 0,32	Bronze d'aluminium
- 0,31	Etain
- 0,29-0,36	Bronzes
- 0,25-0,28	Cupro-nickels
- 0,20	Nickel
- 0,18	Acier inoxydable au chrome nickel molybdène Z2 CND 17.13 (actif)
- 0,15	Titane
- 0,084	Acier inoxydable au chrome nickel Z2 CN 18.10 (passif)
- 0,075	Monel
- 0,050	Acier inoxydable Z2 CND 17.13 (passif)
+ 0,090	Graphite

Les atomes de l'un des métaux en contact avec l'électrolyte perdent des électrons (2 pour le fer par exemple) qui s'en vont, par le conducteur les reliant, vers l'autre métal. Dans le même temps, les atomes ayant perdu leurs électrons et étant, de ce fait, devenus des ions négatifs quittent leurs voisins pour se précipiter vers l'autre métal (FIGURE 5-11) où ils sont réduits par les ions positifs d'hydrogène contenus dans l'électrolyte ce qui libère de l'hydrogène gazeux.

Le métal qui perd ses atomes a un comportement anodique et son potentiel est négatif par rapport à l'autre qui possède un comportement cathodique. On remarquera au passage que les premiers observateurs, s'ils ont bien compris le sens du phénomène dans l'électrolyte en donnant les signes - à l'anode et + à la cathode en ont conclu que le courant dans le conducteur fermait le circuit en allant du + vers le - ce qui est devenu le sens conventionnel, alors qu'en réalité, les électrons se déplacent en sens inverse.

En changeant la nature, ou même simplement l'état, des métaux on constate que la différence de potentiel varie, de même si l'on modifie l'électrolyte, et l'on observe que la dégradation du métal anode est d'autant plus rapide que sa différence avec le métal cathode est plus grande, que l'électrolyte est plus concentré, plus chaud, plus oxygéné, etc.

Pour s'y retrouver, on établit une table de potentiels galvaniques, ou de dissolution, en mesurant la différence de potentiel en volts entre un métal et une électrode de référence dans un électrolyte de composition définie et à une température précise.

En fait ces valeurs sont assez théoriques car des différences parfois très grandes peuvent apparaître en fonction de la pureté du métal, de son mode d'élaboration, d'adjonctions diverses, des teneurs des composants des alliages ou de leur passivation.

Sur ce dernier point, on remarquera en effet la très grande différence entre les états actif et passif d'un acier inoxydable ordinaire et d'un acier inoxydable au molybdène, ce dernier apport favorisant la passivation. Nous verrons plus loin en quoi consiste celle-ci.

De même, les alliages légers seront extrêmement sensibles aux différences de structure résultant de leurs traitements thermiques, et par conséquent des effets de la soudure. On admet qu'une différence de 0,2 V en eaux froides ou peu salées et de 0,15 V en eau de mer chaude est tolérable.

Toutes les valeurs du tableau étant négatives, les métaux du haut du tableau (on dit qu'ils sont les moins nobles) se comporteront en anode vis-à-vis des plus nobles qui sont situés en dessous.

Encore plus nobles que ceux du tableau, on trouvera l'argent (référence 0), l'or et le platine (positifs) ainsi que le graphite. Ce dernier point est intéressant car il explique de façon évidente les graves problèmes de corrosion rencontrés lorsque l'on a voulu raidir des mâts en alliage léger avec des fibres de carbone ou de graphite, ou réaliser des mèches de gouvernail en carbone sur des manchons en alliage léger, ce qui représentait une différence de potentiel de 0,9 V.

Pour que la pile constituée par nos deux métaux entre en activité, il faut qu'un circuit électrique les relie. Mais il n'est pas nécessaire que ce circuit soit constitué par un lien métallique, n'importe quel matériau conducteur peut remplir ce rôle.

Il en est ainsi d'un bois humide, de sorte qu'une vis en bronze détruira la galvanisation puis le corps d'un clou galvanisé placé à proximité dans un bordé et une membrure imprégnés d'eau. De même, il ne servira à rien d'isoler soigneusement un lest et ses boulons d'une coque en alliage léger si, à l'intérieur, l'écrou est laissé sans protection et que l'eau des fonds vient faire le lien avec le bordé. Autre exemple : le circuit de refroidissement du moteur; il ne sert à rien de prévoir une vanne en plastique ou un élément de canalisation isolant, quand la vanne est ouverte l'eau assure le lien avec la fonte du bloc-moteur, d'où le rôle des anodes placées dans ce circuit, sur le moteur.

Ces liens indirects sont certainement les plus difficiles à prévoir et à diagnostiquer.

Des liaisons accidentelles peuvent également se produire. Ainsi une coque en alliage léger n'aura rien à craindre de sa voisine en acier, si rien n'établit le passage du courant entre elles. Mais que leurs chaînes de mouillage viennent en contact et la pile démarre.

C'est ainsi que le trimaran en alliage léger *Manureva* à Alain COLAS étant resté de longs mois amarré par une chaîne sur une tonne en acier du port de Papeete, une corrosion très grave de tout le bateau s'était déclarée qui n'a peut-être pas été étrangère à sa disparition ultérieure.

Voyons maintenant ce qui se passe au sein d'une électrode en alliage, du laiton par exemple, placée dans l'électrolyte. Cet alliage est constitué principalement de cuivre et de zinc dont la différence de potentiel est de 0,64 V, plus de quatre fois ce qui est admis en eau salée.

Ces deux métaux constituent donc une pile et, comme ils sont en contact électrique intime, la pile va s'user, c'est-à-dire que le zinc va disparaître progressivement et il ne restera plus que le cuivre, c'est une corrosion sélective qui conduit à la dézincification du laiton qui devient poreux et cassant. Retenons de cet exemple que le laiton est un métal qui n'a pas sa place à bord sous quelque forme que ce soit, si ce n'est à la rigueur pour la visserie assurant la tenue d'éléments secondaires d'emménagements protégés de l'humidité par peinture ou vernis.

Il faudra également se méfier de certains bronzes de décolletage dans lesquels du plomb conduit à une corrosion sélective. On rencontrera également ce type de corrosion dans certaines fontes, mais cette fois en raison de différences de structures des grains du métal. En revanche, certains métaux ajoutés à l'alliage de base peuvent jouer un rôle inhibiteur de la corrosion sélective.

Le phénomène que nous venons d'observer au sein d'un alliage à différence de potentiel forte peut se retrouver au niveau d'un métal seul ou d'un alliage dont les composants ont une différence de potentiel faible. Les causes peuvent en être très diverses.

La tôle d'acier, par exemple, lorsqu'elle sort du laminoir, ou la fonte, est recouverte d'une couche d'un oxyde de couleur noir bleuté qui ne se forme qu'à haute température, la calamine, qui est normalement protectrice du fer. Mais sa couche n'est jamais uniforme et, en de nombreux points, des écailles laissent le fer à nu. La calamine, nettement plus positive que le fer, va se comporter en cathode et accélérer le processus de formation de la rouille sur les parties non protégées.

Cette hétérogénéité du métal peut être provoquée par les traitements thermiques ou mécaniques locaux que le métal

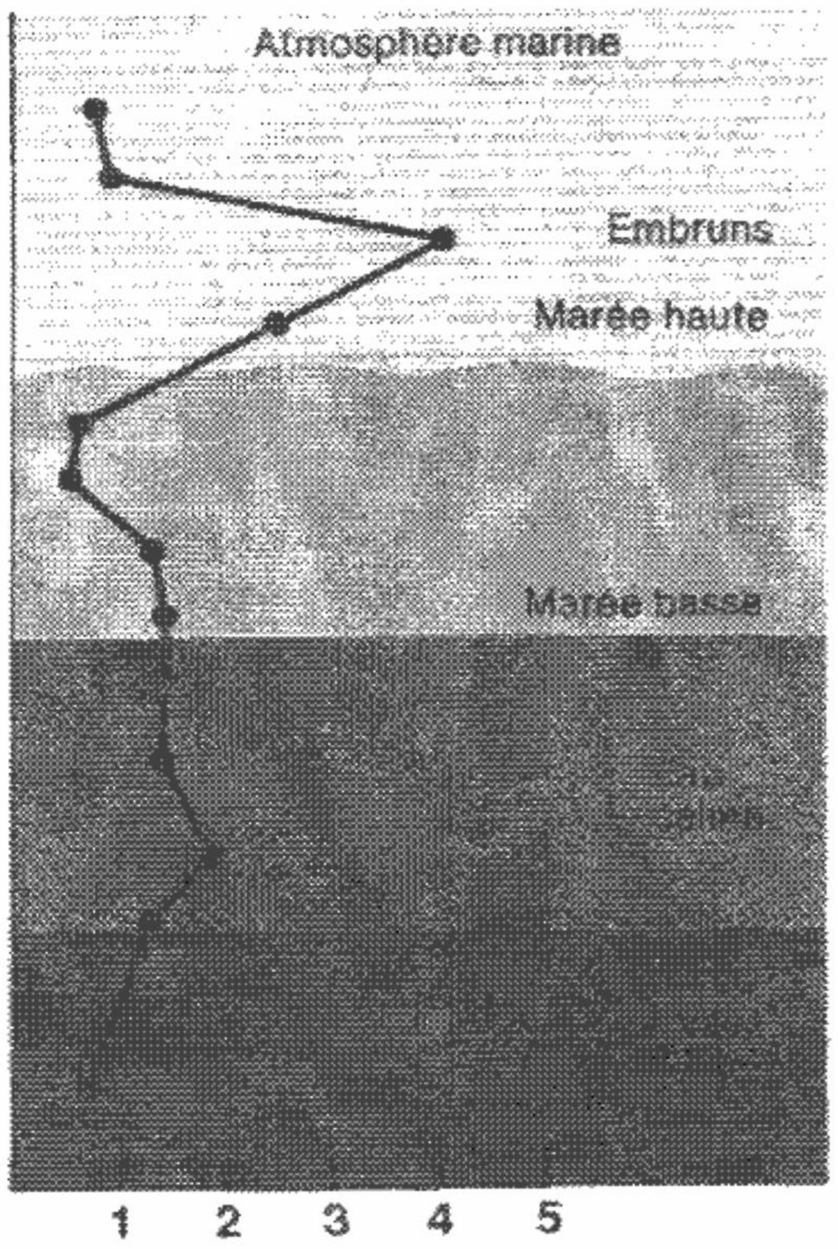


Fig. 5-12 • Corrosion de l'acier en 1/10 de millimètre par an, selon la situation.

aura subis au cours de sa transformation ou de sa mise en œuvre : écrouissage, recuit local, et surtout soudure, tant par ses effets thermiques que par les inclusions diverses qu'elle peut abriter.

Une autre cause réside dans une différence d'oxygénation de l'électrolyte entre diverses parties de la couche limite avec le métal. Dans un estuaire, les couches d'eau, du fait de leurs différences de salinité et de température, ne se mélangent pas immédiatement et une coque peut ainsi se trouver placée dans des courants de caractéristiques très différentes. Les polluants peuvent également intervenir en eau salée mais surtout en eau douce. La vitesse du courant d'eau peut aussi accélérer ou retarder la corrosion, par exemple en empêchant la fixation de la végétation et des salissures. La simple différence d'exposition ou de profondeur d'immersion en eau de mer a une influence considérable comme le montre le graphique de la FIGURE 5-12. On y remarque, en particulier, l'énorme différence entre la zone soumise aux embruns, et donc largement oxygénée, et les parties immergées. On notera aussi la faible corrosion au niveau de la mimarée. Ici l'allée et venue de l'eau perturbe le cycle de formation de la rouille en provoquant l'arrachement des écailles en formation. D'une façon générale, on constatera toujours une augmentation importante de la corrosion sur le métal

Fig. 5-13 • Aération différentielle sous une goutte d'eau. Le métal situé au centre, moins oxygéné, se comporte comme une anode par rapport à celui situé sur le pourtour.

situé juste au-dessous du niveau de séparation entre l'air et l'eau, les couches superficielles de celle-ci étant largement oxygénées par l'agitation de la surface. Dans tous les cas, il y a corrosion directe par enrichissement local de l'oxygène.

Cette différence d'oxygénation revêt un caractère tout particulier lorsqu'elle se produit à petite échelle, sous une goutte d'eau par exemple (FIGURE 5-13), on l'appelle alors **aération différentielle**.

Dans celle-ci, la surface située à la périphérie est en effet plus oxygénée que la partie centrale qui devient anode par rapport à elle et provoque une corrosion en piqûre ou en caverne. Il y a ici appauvrissement en oxygène.

Il est difficile de différencier ce phénomène d'autres liés au confinement et à l'accumulation de poussières humides ou de boues et qui entraînent des corrosions d'aspect semblable. C'est en particulier le cas à chaque fois qu'un élément de surface est caché. Cela peut être dans un joint entre deux métaux semblables ou différents mais dans lequel l'humidité s'est infiltrée, pour une vis dans du bois humide, dans un recoin de la structure où la saleté s'est accumulée et retient l'eau de ruissellement, enfin partout où celle-ci peut stagner. En immersion, elle peut aussi être provoquée par la végétation ou les animaux qui se fixent à la surface. Les sécrétions organiques de ceux-ci peuvent bien sûr accélérer le processus en modifiant les caractéristiques de l'électrolyte.

Le cas de la vis fixant une pièce immergée est particulièrement spectaculaire car au bout d'un temps parfois très rapide (quelques semaines) on ne retrouve, sous une tête intacte, qu'un moignon de métal rongé, surtout si la tête servait à tenir une pièce de même métal et de grande surface.

La partie de la pièce noyée dans le bois a été soumise à une aération différentielle par rapport à celle-ci, le phénomène étant généralement déclenché par une dépassivation provoquée par l'acidité du bois. Dans de tels montages, il semble que les alliages de cupronickel, *Monel*, *Arcap*, *Supermétal*, se comportent beaucoup mieux, surtout si l'on a pris soin d'enduire la vis de graisse neutre, lanoline ou silicone, avant son vissage.

Nous venons de dire à propos du cas précédent que la dimension relative des surfaces en cause avait de l'importance. En effet, si dans le circuit qui relie les deux électrodes nous remplaçons le voltmètre par un ampèremètre nous constaterons que l'intensité du courant est d'autant plus élevée que le rapport entre les surfaces de l'anode et de la cathode est plus faible. *A contrario* si la surface de la cathode devient très faible, l'intensité du courant sera tellement réduite que celui-ci sera presque interrompu, la corrosion sera alors pratiquement stoppée.

La perte de poids de l'anode est définie par la formule :

P = M.I.t / n.96 500 dans laquelle :

P = poids de l'anode dissoute ;

M = masse atomique ;

I = intensité du courant de corrosion ;

t = durée du processus ;

n = valence.

Cet effet de la différence des surfaces permet d'utiliser une visserie en acier inoxydable pour fixer des pièces en alliage léger sans que, dans la majorité des cas, ne se produise une corrosion accélérée de celui-ci. Pour que le processus de corrosion tombe à une valeur admissible, il faut que le rapport des surfaces alliage léger/acier inoxydable mouillées simultanément soit supérieur à 15, ce qui n'est pas toujours le cas. Dans toute la mesure du possible, il sera toujours préférable d'isoler la visserie en acier inoxydable, ne serait-ce que par un vernis ou d'utiliser une visserie en alliage léger 6060 ou 7075.

Un autre facteur, surtout sensible sur les alliages, d'autant plus que leurs performances sont élevées, et qui peut accroître dans des proportions importantes la corrosion, est la fatigue mécanique du métal sous contrainte continue et, encore plus, alternée. La structure même de l'alliage est alors atteinte par une corrosion intercristalline *, le phénomène se conjuguant avec la fatigue pour conduire à la rupture fragile que nous avons décrite plus haut. Il peut atteindre aussi bien un bordé mal renforcé qu'un hauban en barre mal calculé ou mal réglé.

• Corrosion électrolytique

Jusqu'ici, nous n'avons considéré que les variables intervenant sur le métal ou l'électrolyte, et dont les conséquences sur la différence de potentiel dépassent rarement le volt. Il est une cause extérieure qui peut entraîner des différences beaucoup plus importantes, c'est la superposition au courant propre à la corrosion galvanique d'un courant parasite ou vagabond (FIGURE 5-14). La corrosion devient alors électrolytique, on parle d'allocorrosion, et la différence de potentiel atteint la somme des deux.

* La corrosion intercristalline peut avoir également d'autres causes.

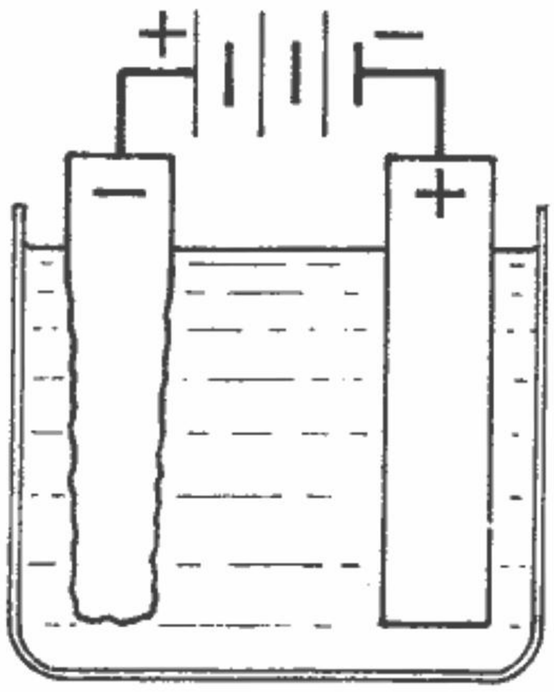


Fig. 5-14 • Corrosion électrolytique par superposition d'un courant extérieur au courant galvanique.

Les effets en sont bien sûr beaucoup plus rapides et ont toujours pour cause une défaillance dans l'isolation des circuits électriques ou une erreur dans leur conception qu'il s'agisse des circuits du bord ou de circuits extérieurs, venant de la terre ou de bateaux voisins.

c ▪ Aspects de la corrosion

Très souvent, les corrosions constatées n'ont pas qu'une seule et unique cause mais sont la somme de plusieurs types de corrosions primaires. Un des premiers éléments du diagnostic réside dans l'examen de l'aspect de la corrosion.

On distingue ainsi :

- **l'attaque uniforme**, qui est l'aspect normal de la corrosion et entraîne une diminution progressive de l'épaisseur. Pour l'acier, elle se traduit par une couche de rouille uniforme, on en tient compte dans le calcul des tôles de bordé lorsqu'il n'est pas possible d'assurer une protection efficace. Sur l'alliage léger, elle est pratiquement nulle formant simplement une poudre grisâtre qui disparaît au jet d'eau. Elle correspond à la formation de la couche passive qui assure la protection.

- **l'attaque sélective**, qui touche certaines parties de la surface plus que d'autres. Elle correspond à des différences de structure soit de la surface du métal (calamine par exemple pour l'acier) soit de toute l'épaisseur, dues à des irrégularités de traitement thermique ou mécanique.

- **les piqûres**, dont la densité et surtout la profondeur permettent d'évaluer la gravité. Elles se présentent sous la forme d'une multitude de petits points débordant des produits de la corrosion. La surface du point n'a pas de signification car elle peut cacher une cavité très profonde. C'est le type de corrosion le plus courant et celui dont il est le plus difficile de mesurer la gravité. Elle provient soit d'impuretés dans le métal, soit, pour l'acier inoxydable ou l'alliage léger, de ruptures dans la couche passive.

- **le feuilletage** se propage le long de plans parallèles à une direction privilégiée comme celle du laminage des tôles. Il est dû à des défauts d'élaboration des produits finis — laminage, traitement thermique — ou de mise en œuvre : soudures.

Les alliages légers de la série 5000 peuvent y être sensibles.

- **les fissures et criques** sont dues généralement à la corrosion sous contraintes. Elles se rencontrent souvent sur l'extérieur de pliages de rayon trop faible ou exécutés sur un métal non recuit. Si ces fissures rayonnent à partir d'un angle, elles signalent une concentration de contraintes, par exemple dans l'angle d'une chape de ridoir ou dans le fond d'un filet de vis, ou à des tensions dans un assemblage soudé.

Dans ces cas, un examen par les rayons X ou aux ultrasons sera nécessaire ainsi, en cas de rupture, qu'un examen et une analyse métallographique.

d ▪ La prévention de la corrosion

Le meilleur moyen d'éviter la corrosion est bien sûr de la prévenir.

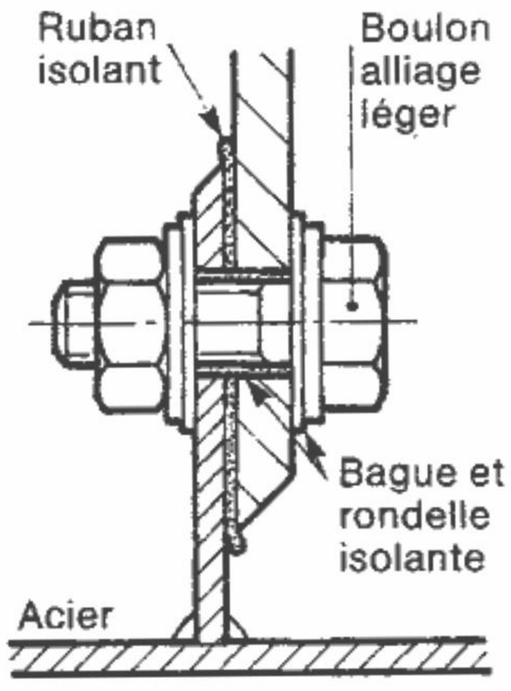
Pour l'architecte, cette prévention se situe d'une part au niveau du choix des matériaux et surtout des alliances entre des matériaux divers, ensuite par le dessin des pièces et des structures, enfin dans la définition des moyens de protection.

Dans les différents chapitres de la partie de ce livre consacrée à la construction, nous avons à chaque fois sélectionné les métaux qui conviennent le mieux à l'environnement marin. Il en sera également fait mention dans d'autres chapitres comme la motorisation, l'installation électrique ou de distribution d'eau. Nous n'y reviendrons donc pas ici.

Dans le dessin des pièces et des structures, deux soucis doivent être constants à l'esprit : éviter les concentrations de contraintes et les causes de fatigue du métal, éviter tout ce qui peut provoquer une aération différentielle.

Le dessin des pièces devra être aussi « fluide » que possible. On éliminera tous les angles vifs convexes ou concaves, les premiers parce qu'ils seront sensibles aux frottements empêchant la passivation ou provoquant l'usure des revêtements protecteurs, anodisation ou peinture, les seconds parce qu'ils constituent des terrains favorables à l'aération différentielle et à la corrosion caverneuse. Le passage d'une section ou d'une forme à une autre se fera toujours progressivement.

Les efforts locaux seront répartis sur une surface aussi étendue que possible et une structure adéquate renforcera toute zone soumise à des contraintes de longue durée ou alternées. On évitera tout point dur ainsi que toute concentration de soudures pour empêcher les trop fortes modifications thermiques du métal.



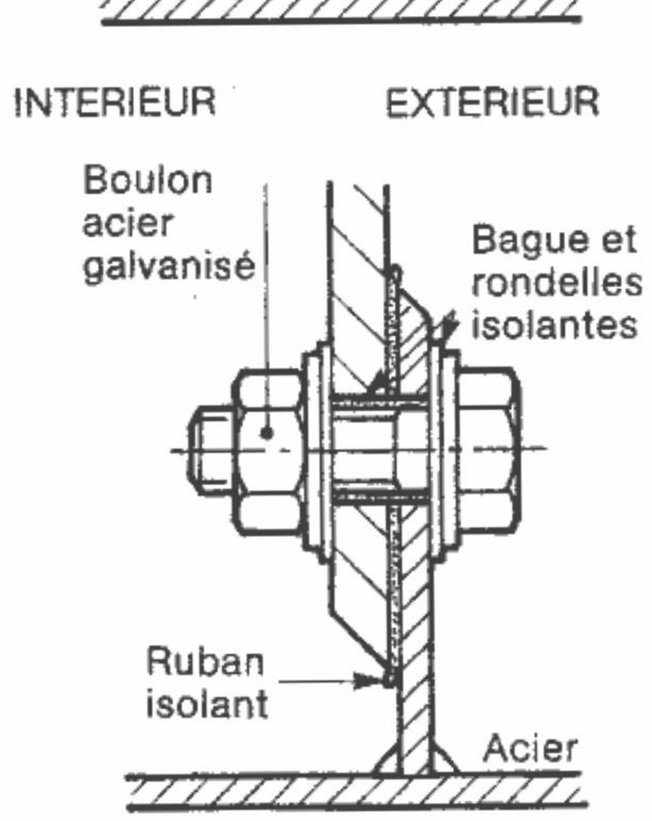


Fig. 5-15 • Montage bimétallique; les boulons ou rivets doivent toujours être du même métal que la partie exposée sur laquelle ils appuient.

Dans les assemblages bimétalliques un joint neutre assurera l'isolation des constituants. Il peut s'agir d'un joint plastique rigide ou souple, d'un simple vernis ou d'une graisse isolante, selon les cas. Pour des pièces en acier inoxydable fixées sur un mât, une couche de vernis phénolique sous la pièce rapportée est généralement suffisante, tandis que les vis en acier inoxydable servant à tenir une pièce en alliage léger seront isolées de celle-ci par un vernis ou une graisse silicone. La FIGURE **5-15** montre de tels joints. Dans tous les cas, ces isolants doivent largement dépasser le pourtour des pièces et les bords de celles-ci doivent être chanfreinés pour éviter toute stagnation d'eau et empêcher la formation d'un pont entre les deux métaux et cela aussi bien sur une face que sur l'autre.

L'assemblage d'un élément en bois sur une pièce métallique ne se fera jamais sans peinture protectrice des deux parties. Cette peinture ne sera appliquée qu'**après** perçage de tous les trous de fixation.

Il ne servirait à rien d'isoler les pièces entre elles si les vis ou les boulons assuraient la liaison électrique. De même les trous dans les mâts doivent être percés avant l'anodisation et, si certains doivent l'être après, ils seront protégés par un vernis, de même que les vis ou rivets servant à la tenue des 37 pièces rapportées.

A chaque fois que cela sera possible, la visserie sera de même nature que les métaux à assembler ou, si des caractéristiques mécaniques élevées ne sont pas nécessaires, on utilisera de la visserie en polyamide.

On ne laissera aucune surface horizontale, même les fonds de cockpit auront une pente calculée pour le bateau au mouillage. Partout, sur le pont comme à l'intérieur, la libre circulation de l'eau devra être assurée, en particulier celle des eaux de condensation. Les lisses devront comporter en leur point le plus bas un petit trou en demi-cercle au ras du bordé. Les dalots de pavois seront meulés au ras du pont. Lorsque, malgré tout il ne sera pas possible d'éviter les stagnations d'eau, les angles seront arrondis par un congé de résine chargée appliqué entre les sous-couches de traitement du métal et la peinture pour permettre un nettoyage facile.

On éliminera bien sûr tout montage définitif par soudure ou collage qui ne permettrait pas l'accès de l'œil et du pinceau. Ceci est d'ailleurs valable même pour les matériaux autres que métalliques.

Sur un bateau, il n'y a pas un centimètre carré qui ne doive pouvoir être visité.

e • Protection contre la corrosion

Les moyens de protection entrent dans deux catégories, la protection cathodique et le revêtement, certains relevant des deux.

• Protection cathodique

La protection cathodique peut être passive ou active. Nous savons que le plus grand risque que court une coque en métal est de se trouver en situation anodique. Le but de la protection cathodique est de créer un environnement dans lequel la coque se trouvera, dans toute la mesure du possible, en situation cathodique.

De ce que nous avons vu du principe électrochimique de la corrosion, nous pouvons tout de suite déduire les deux moyens disponibles pour y arriver : mettre la coque en présence d'un métal plus négatif, c'est la protection passive, ou agir sur le courant créé entre la coque et une électrode de référence, c'est la protection active.

Dans ce procédé, un faible courant de polarisation contrôlé électroniquement est injecté entre la coque et une ou plu-

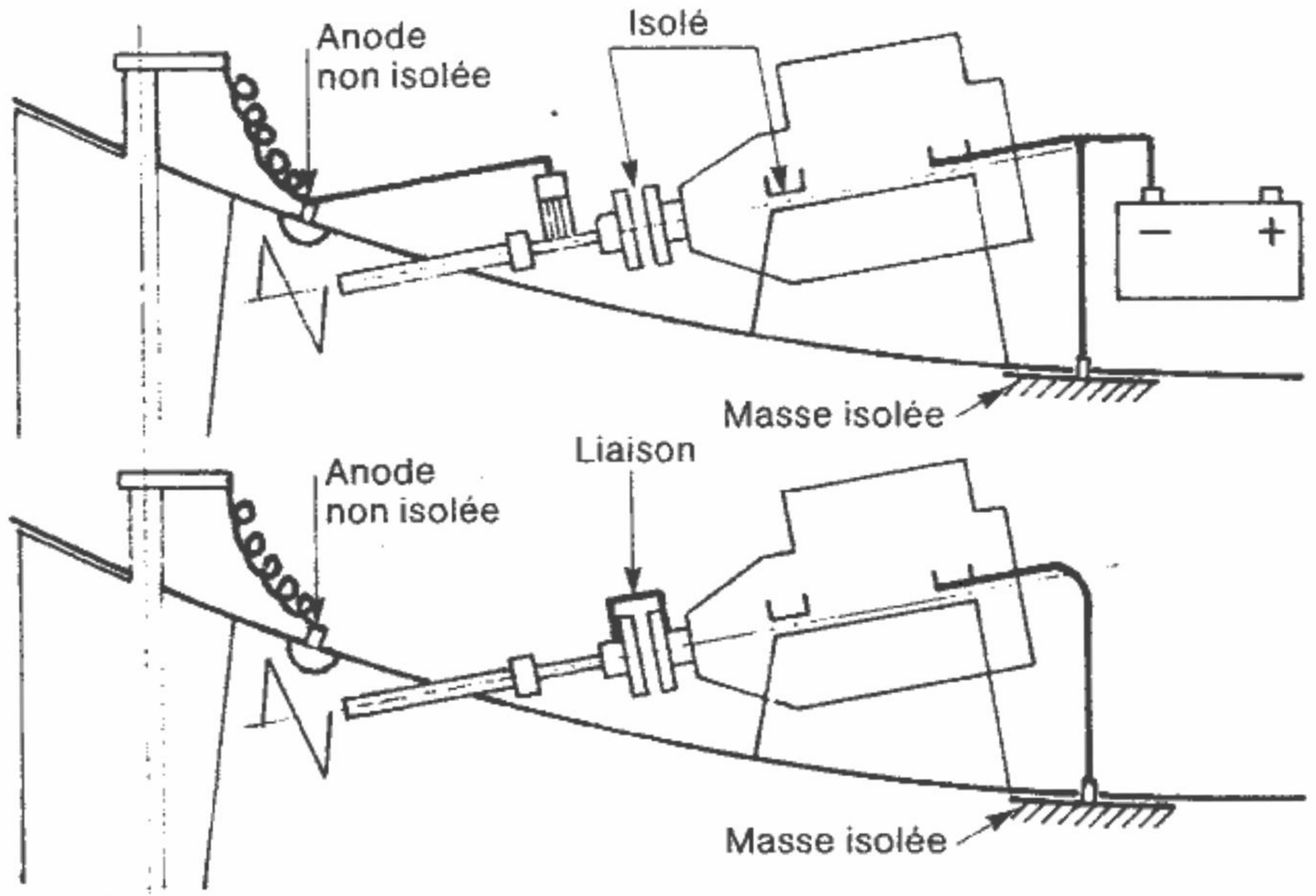


Fig. 5-16 • Mise à la masse des éléments liés au moteur dans le cas d'un circuit électrique moteur à un conducteur avec négatif à la masse (en haut) et d'un circuit à deux conducteurs isolés (en bas). Il faut noter que dans les deux cas, le moteur lui-même doit être relié à une plaque de masse isolée de la coque pour assurer la mise à la terre du circuit d'alimentation en carburant; dans le premier cas, cette masse est reliée au pôle négatif de la batterie, dans le second, elle ne l'est pas.
L'arbre d'hélice peut être relié à la masse du moteur ou isolé et relié par un frotteur à une anode extérieure non isolée comme pour la mèche du safran. Cette solution semble donner de meilleurs résultats pour l'élimination des parasites radioélectriques dus à la rotation de l'arbre.

sieurs électrodes réparties à sa surface lui assurant ainsi une situation permanente de cathode. La consommation de courant est très faible mais il ne semble pas que ce procédé ait été utilisé couramment en plaisance, si ce n'est dans le système *Mercathode* mis au point par Mercury pour la protection des embases de moteurs hors-bord ou à transmission en Z.

La protection passive consiste à placer, sur la surface de la coque ou à proximité, des masses de métal de potentiel galvanique inférieur, reliées électriquement, et que l'on appelle anodes sacrificielles. Ce sont elles qui se dissoudront au bénéfice de la coque, de l'hélice ou de toute autre pièce plus positive. Le métal de l'anode est généralement du zinc, mais ce peut être aussi de l'aluminium, du magnésium ou un alliage des deux. La forme est généralement profilée pour les modèles qui intéressent les bateaux de plaisance et la fixation à la coque se fait par des boulons, des goujons ou un étrier en acier galvanisé noyé dans l'anode et soudés à la coque si celle-ci est en acier.

Toutes les parties à protéger doivent être reliées électriquement (FIGURE **5-16**). C'est le cas en particulier pour l'arbre d'hélice et la mèche de safran, isolés la plupart du temps par leurs paliers en caoutchouc ou en plastique. Cette liaison éliminera d'ailleurs bon nombre de parasites radioélectriques. Pour l'arbre d'hélice, il sera souvent nécessaire de prévoir un frotteur **relié** à la coque entre le presse-étoupe intérieur et le tourteau d'accouplement. La mèche sera raccordée à la coque par un câble électrique souple isolé de 4 mm² de section fixé sur le secteur de commande ou toute autre pièce.

Il est possible également de relier directement le moteur et l'anode ainsi que l'arbre d'hélice et la sortie du réducteur si l'accouplement est élastique, et donc isolant. Mais on préfère généralement, surtout pour des coques en alliage léger, que le moteur soit isolé et que tout son équipement électrique se fasse sur deux fils sans retour à la masse, ceci afin d'éviter tout risque d'allocorrosion.

Malheureusement, tous les fabricants de moteur ne proposent pas cette solution soit d'origine (comme *Perkins*), soit à l'aide d'un kit de modifications (comme *Volvo*). Dans ce cas, le moteur sera néanmoins isolé de la coque par ses silentblocs et l'accouplement élastique de l'arbre d'hélice (vérifier leur rigidité diélectrique), et sa masse sera reliée au pôle négatif de la batterie.

Le nombre, la surface et la disposition des anodes dépendent de la surface mouillée de la coque et des autres pièces à protéger, hélices, safran, etc.

Leur volume sera en rapport avec la durée de vie que l'on en attend. On peut cependant partir des bases approximatives suivantes pour des anodes en zinc sur une coque peinte :

Surface en mm² par m² de surface mouillée	Épaisseur en mm par mois de protection
Acier peint 1 500	2
Alliage léger 5 000	1

Ceci ne comprend pas les anodes spécifiques de l'hélice et du safran s'il est séparé de la quille.

La FIGURE **5-17** donne un exemple de disposition recommandée par un fabricant, on se référera de toute façon à leurs recommandations.

Sur une coque en acier, les anodes sont en zinc mais sur une coque en alliage léger, pour obtenir une différence de potentiel aussi élevée que possible, on peut utiliser des anodes en magnésium. Cependant, leur prix est beaucoup plus élevé et leur efficacité mise en doute par certains.

Pour une raison inconnue, il s'avère qu'en pratique peu de bateaux en alliage léger sont pourvus d'anodes, ils en ont pourtant plus besoin que ceux en acier. S'il est vrai que les précautions prises à la construction sont souvent plus grandes (ce qui peut justifier une protection plus limitée en navigation), au mouillage et surtout au port, les causes extérieures de corrosion pouvant être nombreuses, il sera alors nécessaire d'installer des anodes pendantes autour de la coque. Il s'agit de cylindres en alliage spécial aluminium-magnésium, moulés sur un câble métallique. Celui-ci est relié à la coque au niveau du pavois, soit par une cosse vissée, soit par une pince crocodile, sur une surface de métal **non protégée** par peinture ou anodisation et prévue à cet effet à l'extérieur de la coque, pour éviter tout frottement qui conduirait à la création d'un contact intempestif entre le câble et le bordé en dehors de la zone *ad hoc*. Une anode pendante accrochée sur un rail de fargues anodisé ou un pavois peint ne sert strictement à rien.

On en dispose une de chaque bord si la longueur hors tout est inférieure à 10 m, deux si elle est supérieure.

Lorsque le bateau est muni d'une hélice, les anodes les plus en arrière sont placées à 50 cm en avant de celle-ci. Autre avantage du système, il permet un contrôle permanent de l'usure des anodes.

D'autres types d'anodes sont utilisés pour assurer la protection des hélices et de leur arbre lorsque ceux-ci sont d'un métal différent, par exemple hélice en bronze et arbre en acier inoxydable, et cela quel que soit le matériau de la coque. Il s'agit alors de bagues, de rondelles ou d'olives fendues, fixées à hauteur du moyeu de l'hélice ou directement sur l'arbre.

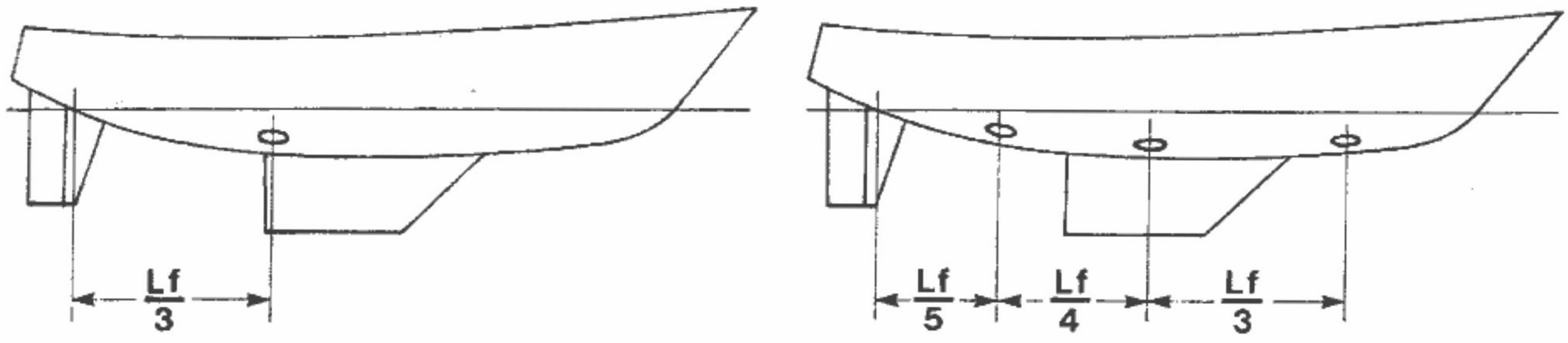
Faut-il rappeler que pour qu'une anode puisse remplir son rôle il ne faut surtout pas qu'elle soit peinte ?

Dernier point, une anode ne doit pas être utilisée comme mise à la masse pour les appareils électroniques ou les paratoudres. Il existe pour cela des plaques de masse spécifiques dont le montage est totalement différent puisque complètement isolé de la coque. Nous en reparlerons dans le chapitre sur l'installation électrique.

Un dernier moyen de protection cathodique utilisé pour l'acier consiste à enrober entièrement la coque ou la pièce à protéger dans un revêtement métallique électronégatif, généralement du zinc.

Pour les pièces assez petites pour pouvoir être placées dans une cuve, on procède à un dépôt de zinc par galvanisation électrolytique ou dans un bain de métal fondu. La première méthode ne satisfait pas aux exigences d'une utilisation marine en raison de la trop faible épaisseur et de la porosité de la couche déposée. Seule la galvanisation à chaud convient, à condition que l'épaisseur de zinc, qui dépend de la température du bain et de la durée de l'immersion, soit suffisante. On considère généralement qu'il faut une épaisseur de 120 microns soit 10 g/dm² pour obtenir une bonne protection en atmosphère marine.

Les normes NF A 91-121 et 122 définissent les propriétés mécaniques, les méthodes d'essais, les spécifications du



-17 • Exemple de disposition d'anodes sur le fond d'une coque en acier.

revêtement et fournissent d'utiles recommandations pour la conception des pièces à galvaniser.

Lorsqu'il n'est pas possible, en raison de leurs dimensions, de galvaniser les pièces par trempage, comme c'est le cas pour une coque, il est possible d'effectuer une métallisation au pistolet ou « shoopage ». Le métal en fusion est projeté sur la tôle immédiatement après son sablage. Les propriétés caractéristiques et les méthodes d'essais de ces revêtements sont définies par la norme NF A 91-201. Un revêtement de coque doit avoir une épaisseur de 200 microns pour présenter une bonne cohésion.

Ce type de revêtement, qui s'était bien développé en Hollande dans les années soixante, a été progressivement abandonné au bénéfice des peintures riches en zinc, plus souples d'emploi et moins onéreuses.

Les revêtements en zinc ne tolèrent pas toutes les peintures. Les peintures à l'huile, en particulier, se délitent assez rapidement sous l'effet de la réaction anodique qui se produit à la surface du zinc. La ligne de peinture utilisée doit donc être compatible avec ce revêtement.

La *Convention Interprofessionnelle de Garantie* — CIG du 14 juin 1968 — établie par le Syndicat National du Revêtement et du Traitement des Métaux, 3941, Rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie et par l'Office National d'Homologation des Garanties des Peintures Industrielles, 28, Avenue du Maréchal Foch, 92260 Fontenay-aux-Roses, définit les conditions de compatibilité des peintures et du revêtement.

Par ailleurs, on pourra se renseigner sur les applications du zinc dans la lutte contre la corrosion auprès de *Zinc Info*, Sté Métaleurop, Péripole 118, 58, Rue Roger Salengro, 94126 Fontenay-sous-Bois.

• Protection par peinture

La protection des coques métalliques s'effectue aujourd'hui par des lignes de peinture adaptées au métal et à son environnement. Ces peintures assurent une double protection cathodique et par isolement. Il est indispensable de choisir la ligne de peinture complète d'un fabricant, adaptée au métal à protéger. Sur ce point, il sera nécessaire de connaître les habitudes du chantier, mais il sera également très important de contrôler la bonne exécution des différentes phases, car trop de constructeurs prennent la peinture pour une simple décoration et n'appliquent pas strictement les prescriptions des fabricants. Or, ce sont les premiers traitements de la coque qui la garantissent pour toute sa vie, faute de quoi la moindre cloque sera source d'aération différentielle et de corrosion que l'on découvrira souvent trop tard.

Et il sera toujours plus onéreux de repartir à zéro sur une coque déjà peinte que de faire le traitement correct en atelier, lors de la construction. Il est enfin une autre raison qui impose cette dernière solution : la nécessité de procéder aux opérations de traitement de la coque après que toutes les soudures sont terminées et que tous les trous de fixation des éléments rapportés ont été percés, à l'intérieur comme à l'extérieur, qu'il s'agisse des emménagements, de l'accastillage, etc., mais avant leur pose. C'est la seule garantie d'une protection totale du métal de la coque. Ces remarques sont valables aussi bien pour l'acier que pour l'alliage léger.

Pour ce dernier, on a considéré pendant longtemps, sous l'influence des fabricants d'alliage qui voulaient ainsi démontrer l'inoxydabilité de leurs produits, qu'une peinture n'était absolument pas nécessaire pour sa protection. On est revenu aujourd'hui sur cette opinion et, si l'on voit encore parfois des coques non peintes dans les hauts, elles le sont toujours sous la flottaison.

Personnellement, je trouve cela particulièrement laid et donne à ces coques, surtout lorsqu'elles sont à bouchains vifs, un aspect « industriel » qui est loin de l'idée que je me fais de la plaisance.

D'autant plus que, si l'on accepte le principe de cette autoprotection du métal, il ne faut surtout pas enlever la couche qui se forme et qui devient vite d'un gris sale, macule tout ce qu'elle touche et, en s'abrasant sous le frottement des parebattage, montre des marbrures inesthétiques.

Enfin, si l'on désire que la surface présente un aspect uniforme, celle-ci doit être poncée en atelier pour effacer toutes les traces de meulage, soudure, etc., ce qui en fin de compte revient presque aussi cher. Il est donc bien préférable de peindre entièrement une coque en alliage léger.

Toute peinture, sur quelque matériau que ce soit, implique que la surface soit d'une part, propre, dégraissée et débarrassée de toute impureté ou trace d'oxydation, d'autre part, qu'elle présente un aspect mécanique de surface facilitant l'accrochage des peintures.

Pour l'alliage léger, on peut procéder à un ponçage mécanique suivi d'un dégraissage et d'un décapage chimique ou dérochage. Les produits recommandés sont indiqués par les fabricants d'alliage. Mais il est certainement préférable, comme le recommande Meta, de remplacer le ponçage par un sablage fin. J'avais personnellement utilisé cette méthode, il y a fort longtemps, pour des pièces d'accastillage avec un très bon accrochage de la peinture.

Le dérochage est toujours suivi d'un rinçage abondant à l'eau douce pour éliminer les produits de la réaction. Veiller à ce que le rinçage soit effectué sous pression et qu'un délai aussi réduit que possible sépare le séchage de la première couche de protection.

Cette première couche est un primaire ayant une action chimique sur le métal par phosphatation, chromisation ou autre. Elle le protège et assure l'accrochage chimique des peintures proprement dites.

Le primaire, comme les couches suivantes, peut être à base de caoutchouc chloré ou de résines vinyliques, acrylique, époxydique ou polyuréthanne, cette dernière étant plutôt réservée aux laques de finition. Les peintures à l'huile ne sont plus utilisées en marine, sauf en association avec des résines alkydes, mais n'ont de toute façon, ni la même résistance ni la même imperméabilité qu'une polyuréthanne par exemple. Pour la peinture intérieure des fonds, on utilisera de préférence un époxy-brai qui assure une excellente protection et, par son épaisseur, permet d'arrondir nombre de rugosités et d'accidents de surface qui pourraient retenir poussière et humidité.

Pour l'acier, les différentes phases du travail de peinture et les produits utilisés sont sensiblement les mêmes si ce n'est que le sablage est impératif car il est le seul capable d'assurer à la fois l'élimination de la rouille et surtout de la calamine et de donner un état de surface correct.

La propreté du décapage est définie par les normes de l'Office National d'Homologation des Garanties des Peintures Industrielles. Trois degrés sont retenus :
D 1 : nettoyage par décapage;
D 52 : décapage soigné;
D 53 : décapage à blanc.

On se réfère parfois aussi à la norme suédoise SIS 05 5900, avec les qualités SA 2, 2,5 ou 3.

L'état géométrique (la rugosité) de la surface est défini dans la norme NF E 05-051, mais on s'y réfère rarement, l'état obtenu par le sablage étant considéré comme satisfaisant.

Les primaires sont soit des peintures phosphatantes ou chromisantes, soit des peintures inorganiques très riches en zinc silicaté. Les couches suivantes sont les mêmes que pour l'alliage léger.

Les conditions d'application des traitements et des peintures sont très importantes pour la garantie du résultat, surtout si le même chantier construit à la fois des coques en acier et en alliage léger. Tout risque de contamination doit être évité ne serait-ce que par les projections de métal résultant d'un meulage. Le sablage doit autant que possible s'effectuer à l'intérieur (ce qui interdit l'usage des sables de silice) de façon qu'il ne se forme pas de condensation lorsque la coque entre dans la cabine de peinture. Celle-ci doit être isolée du reste de l'atelier pour éviter toute inclusion de poussière métallique et maintenue dans des conditions climatiques adaptées au type de peinture utilisé. L'idéal est une température comprise entre 18° et 20° C et un degré hygrométrique inférieur à 75 %, tout au moins pour les peintures à base de résine de synthèse, les autres sont plus tolérantes, mais le chantier devra suivre scrupuleusement les prescriptions du fabricant.

Les antifoulings à base de composés métalliques positifs tels que cuivre, étain ou mercure, sont bien sûr interdits.

Une peinture au bronze sur un lest en fonte m'a valu de gratter et de réenduire celui-ci chaque année jusqu'à ce que je me décide à le meuler entièrement et à repartir à zéro. Certains composés métalliques, comme l'étain et le mercure, sont d'ailleurs désormais interdits par la loi pour des raisons de pollution. Les principaux fabricants de peintures proposent des produits de remplacement.

• Protection des pièces autres que la coque

Les pièces d'accastillage doivent, comme les coques, recevoir un traitement de protection adapté à la nature des métaux dans lesquels elles sont fabriquées.

Pour les pièces en acier inoxydable le traitement consiste avant tout en un décapage suivi d'un polissage aussi soigneux que possible et une passivation.

Le décapage doit éliminer toute inclusion métallique, autre que le métal de base, résultant des opérations d'usinage ou de soudage.

La passivation réside dans la formation d'oxyde du métal ou de l'un des composants d'un alliage (aluminium et magnésium pour l'alliage léger, chrome pour l'acier inoxydable). Dans des conditions normales, elle s'effectue naturellement au contact de l'air. Elle peut être accélérée ou provoquée par un traitement chimique, mais elle peut être empêchée par des phénomènes chimiques ou mécaniques. C'est ainsi que des arbres d'hélices en acier inoxydable peuvent se corroder à l'intérieur des paliers où le frottement élimine systématiquement toute formation de la couche passive, dès que l'hélice tourne.

Certaines adjonctions à l'alliage de base, comme le molybdène pour l'acier inoxydable, par exemple, assurent une accélération ou une protection de la passivation.

On n'insiste jamais assez sur l'importance du polissage qui doit éliminer toute piqûre ou rayure qui pourrait perturber la couche passive et constituer l'amorce d'une corrosion par piqûre.

L'outillage utilisé pour ce polissage doit être strictement réservé à ce métal et ne comporter aucun élément en métal électropositif, pas de brosse métallique en fer, on peut en revanche utiliser des brosses en alliage cuivreux.

Pour les pièces en acier non allié, la galvanisation reste la protection la plus sûre, complétée éventuellement par une peinture adaptée, à condition que l'épaisseur et la tenue de la couche soient garanties.

L'alliage léger est pratiquement toujours protégé par une oxydation anodique, ou anodisation, qui consiste à transformer la couche superficielle du métal en alumine par un traitement électrochimique. La qualité de la protection dépend principalement de l'épaisseur de la couche d'alumine, mais aussi du colmatage qui consiste à « bouche-porer » la structure poreuse de celle-ci par sa transformation en monohydrate d'alumine dans un bain d'eau bouillante. Une bonne oxydation anodique doit avoir une épaisseur d'au moins 20 μ et le rinçage après traitement et le colmatage seront effectués avec de l'eau déminéralisée afin d'éliminer toute inclusion d'acide ou de base dans la couche poreuse. Au cours de ces opérations, on procède à la coloration du métal tandis que son aspect de surface, du mat au brillant, est obtenu par des moyens mécaniques ou chimiques précédant l'anodisation.

5 ISOLATION THERMIQUE ET ACOUSTIQUE

Le métal étant un bien meilleur conducteur de la chaleur et du bruit que le bois ou le plastique armé, une coque réalisée dans ce matériau demandera, pour être confortable, une isolation thermique et phonique.

Si la nécessité de cette dernière se conçoit aisément, la première est surtout importante en raison de son effet secondaire : la condensation. Celle-ci se produit à partir du moment où de l'air chaud et humide se trouve au contact d'une paroi froide, cas qui se présente soit de façon continue si l'air extérieur reste plus froid que celui stagnant à l'intérieur du bateau, soit, plus généralement, en fin de nuit lorsque l'air extérieur atteint sa température la plus basse alors qu'à l'intérieur il a peu varié et surtout qu'il s'est chargé de la vapeur d'eau dégagée par les dormeurs (un dormeur expulse environ 0,05 litre d'eau par heure). Comme il ne sera pas possible d'assurer une isolation absolue du bordé, c'est ce second cas qui sera le plus courant.

Pour isoler réellement un bordé, il faudrait que le matériau isolant lui soit intimement lié, soit par application directe, soit par collage. Dans ces conditions, seulement, la variation de température pourra s'effectuer progressivement à travers le matériau composite constitué par le métal et l'isolant. Ce n'est également que par cette continuité que pourra être modifiée la réponse aux vibrations de la tôle du bordé.

Bien sûr, ces deux solutions idéales existent, il est possible de projeter sur le bordé une mousse de polyuréthanne comme cela a été fait par exemple sur le *Pen Duick VI;* sur un bordé développable, on peut également coller des plaques de mousse ajustées entre lisses et membrures. Mais ces solutions comportent un risque énorme, celui de laisser quelques fissures, quelques poches d'air dans lesquelles l'humidité ne manquera pas de se glisser offrant à la corrosion par aération différentielle un milieu on ne peut plus propice. Il est impossible d'assurer que l'étanchéité entre la tôle et l'isolant sera égale à 100 %. D'autre part, un tel procédé transgresse la règle d'or selon laquelle pas un centimètre carré de bordé ne doit rester invisible.

Dès l'instant où il n'est pas possible d'assurer cette liaison intime et totale, l'isolation ne peut être garantie que partiellement et il est alors absolument indifférent que la lame d'air qui séparera le bordé de l'isolant soit de quelques dixièmes ou de quelques millimètres et il sera préférable de prendre suffisamment de marge pour être absolument certain qu'il n'y aura aucun contact entre eux.

Bien sûr, il se produira une condensation sur la tôle, mais celle-ci ne sera pas gênante pour les occupants si elle est convenablement canalisée vers les fonds ou des gouttières appropriées. Quant aux vibrations, leur caractère ne sera pas modifié, mais les mouvements de la lame d'air qu'elles engendrent seront atténués, voire absorbés, par l'isolant.

Cet isolant sera constitué à peu près uniquement de mousse synthétique à cellules fermées en PVC ou polyuréthanne. La mousse de polystyrène, surtout si elle est constituée de billes agglomérées, doit être rejetée car elle se délite et absorbe facilement l'humidité. On évitera également les mousses de polyuréthanne utilisant le CO^2 comme agent moussant car leur reprise d'humidité est plus élevée que chez celles utilisant des gaz non avides d'eau comme le fréon.

Les plaques de mousse, dont l'épaisseur sera fonction de l'espace laissé libre par la structure, seront collées sur les panneaux de vaigrage fixés à celle-ci et peints afin de sceller leur surface et d'éviter ainsi qu'elles se délitent et qu'elles absorbent de l'humidité.

Colle et peinture doivent être adaptées à la nature de la mousse pour éviter toute réaction inopportune.

Les panneaux de vaigrage eux-mêmes, généralement en contreplaqué, seront fixés aux membrures par des attaches non métalliques. Il est indispensable en effet d'éviter la formation d'un pont thermique, comme le ferait une vis métallique par exemple, sur laquelle la condensation se formerait. On pourra utiliser des vis en polyamide, des clips comme en automobile ou même de la bande Velcro ou, à la rigueur, des tasseaux de bois, boulonnés sur les éléments de structure métallique, sur lesquels sont vissés les panneaux. Il est important que la fixation des panneaux de vaigrage laisse à ceux-ci une certaine liberté de jeu pour se prêter aux déformations de la carène (FIGURE **5-18**).

Ne seront vaigrées que les surfaces situées au-dessus de la flottaison. L'eau constitue un volant thermique qui atténue considérablement les variations de température dans la cale.

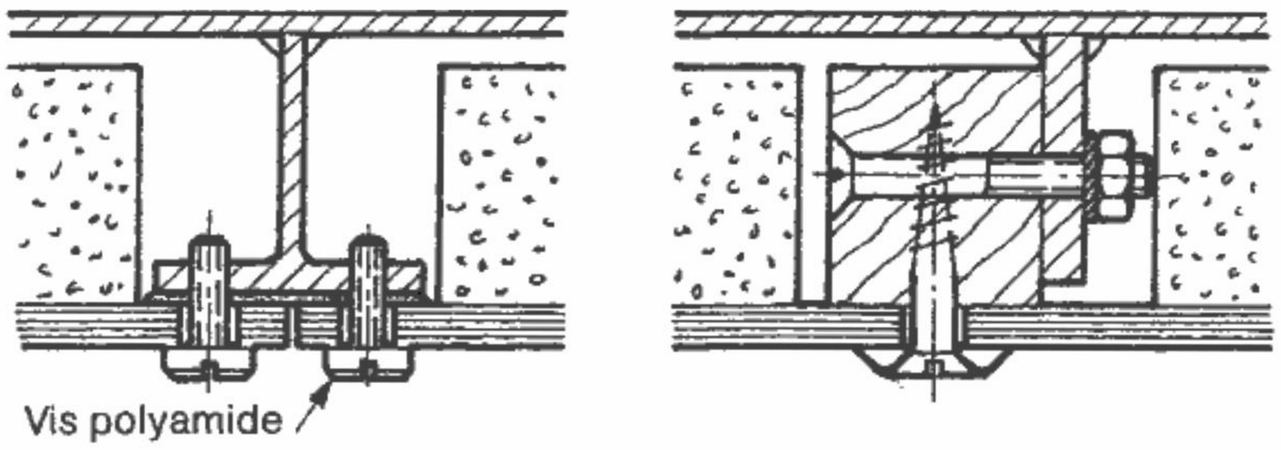


Fig. 5-18 • Exemples de montage de vaigrages ; il faut toujours leur laisser une possibilité de jeu.

Nous reviendrons dans le chapitre sur la motorisation à l'isolation du compartiment moteur qui revêt un aspect tout à fait différent et commun à tous les matériaux de construction.

C ▪ LES PLASTIQUES ARMÉS

On entend par plastiques armés tous les matériaux composites constitués d'une matrice de résine synthétique enrobant des fibres résistantes.

Les résines, comme les fibres, peuvent être extrêmement diverses, mais nous insisterons plus particulièrement sur le couple le plus répandu dans la construction de plaisance « commerciale », la résine polyester et la fibre de verre moulées selon le procédé « au contact », réservant un paragraphe séparé aux produits dits « exotiques » qui, à de rares exceptions, ne concernent que des constructions hors série.

1 LE STRATIFIÉ

Le stratifié tient son nom des strates que représentent les différentes couches de renfort noyées dans la matrice. Si sa réalisation relève essentiellement de la responsabilité du constructeur, l'architecte doit connaître les contraintes auxquelles celui-ci doit faire face, et surtout il doit définir les spécifications dont dépendent les caractéristiques mécaniques du produit fini.

Pour cela, nous allons procéder à un survol des deux composants : la résine et les renforts.

a ▪ La résine

Les résines utilisées dans la stratification manuelle sont des polyesters d'acides insaturés constitués de deux produits : des chaînes à double liaison de polyesters et un monomère, le styrène, la réaction de l'un sur l'autre provoquant le durcissement ou polymérisation de l'ensemble par association des doubles liaisons du polyester et du monomère.

Cette réaction s'effectue spontanément, mais à une vitesse très lente de l'ordre de six mois à un an, à moins que des facteurs extérieurs ne viennent en modifier le déroulement. Certains, comme la chaleur ou la lumière favorisent le durcissement, d'autres, comme l'humidité, peuvent l'empêcher.

Parmi ces inhibiteurs, il en est un qui est particulièrement gênant dans notre cas, le phénol qui est utilisé dans les colles de contreplaqué. Si une partie de la colle a migré à travers les plis extérieurs trop fins ou poreux, l'accrochage du stratifié sera mauvais. Des traitements adaptés doivent donc être appliqués sur le contreplaqué avant d'appliquer la résine.

Un autre inhibiteur que l'on peut rencontrer, en particulier dans l'outillage utilisé, est le cuivre.

Pour favoriser la réaction, on introduit dans le mélange un catalyseur (ou durcisseur) qui ramène la durée de durcissement à quelques heures. Mais ceci étant encore trop long, un accélérateur (ou promoteur), qui seul n'aurait aucun effet sur le produit de base, provoque le déclenchement rapide du processus, la réaction de l'accélérateur sur le catalyseur entraînant un dégagement de chaleur important qui favorise le durcissement.

La mise en présence directe du catalyseur et de l'accélérateur peut d'ailleurs conduire à une réaction extrêmement violente, voire explosive.

Les catalyseurs les plus courants sont des peroxydes (de méthyléthylcétone, de cyclohexanone, de lauryle) et les accélérateurs des amines (diméthylaniline) ou des siccatifs (octoate de cobalt).

Le produit liquide livré au constructeur par les fabricants de résines comprend la résine, le monomère et souvent l'accélérateur, ainsi qu'un inhibiteur destiné à éviter une réaction spontanée en cours de transport ou de stockage. La viscosité du produit est fonction du type de résine et de la proportion de monomère utilisé comme solvant.

Les résines sont souvent classées par les fabricants en rigides, semi-rigides et souples dont la réactivité va en

décroissant. Pour la stratification des coques de bateaux, on utilise généralement des formules semi-rigides ou des mélanges rigides et semi-rigides.

L'augmentation de la proportion de monomère, si elle réduit la viscosité, rend la résine plus rigide, donc plus cassante et augmente le retrait qui se produit au cours du durcissement. Une faible viscosité n'est d'ailleurs pas forcément la garantie d'une meilleure imprégnation des renforts. En revanche, elle est presque toujours la cause de la persistance à long terme de l'odeur très désagréable à l'intérieur des coques, le styrène en excès diffusant progressivement à travers le stratifié, et d'une certaine porosité favorable aux phénomènes d'osmose.

Dès que tous les ingrédients sont mis en présence, la réaction débute et l'on constate une élévation progressive de la température, jusqu'à 50° C environ, durant quelques minutes au cours desquelles la résine reste liquide et peut être travaillée. Au bout d'un temps de l'ordre de 5 à 10 minutes, la résine prend en un gel analogue à la gélatine du charcutier et sa température s'élève rapidement jusqu'à un pic exothermique qui se situe vers 200° C (FIGURE 5-19).

A partir du moment où la résine est en gel, il n'est plus possible de la travailler sous peine de rompre les liaisons intermoléculaires qui se forment et de détruire les caractéristiques mécaniques du produit final.

La température retombe ensuite progressivement, mais la polymérisation complète de la résine n'est pas terminée pour autant. Celle-ci suit une courbe asymptotique et l'on ne peut la considérer comme pratiquement achevée que plusieurs mois après la mise en œuvre. Néanmoins, au bout d'une quinzaine de jours, la coque a acquis une part suffisamment importante de ses caractéristiques mécaniques pour pouvoir être utilisée. En revanche, une coque sortant de démoulage doit être manipulée avec précaution et placée dans un conformateur pour la suite des opérations, faute de quoi les déformations qui en résulteraient rendraient extrêmement aléatoire l'ajustage des autres éléments, emménagements, pont et superstructures.

La forme de la courbe donnée en exemple, qui correspond à une résine pure, sera modifiée par l'importance de sa masse, les charges et les renforts qui y seront inclus.

Pour une température, un degré hygrométrique et une épaisseur de stratifié donnés, le temps de gel et le profil de la courbe exothermique peuvent être adaptés en modifiant les proportions et le type du catalyseur et de l'accélérateur utilisés. Dans un chantier sérieux, ces paramètres sont soigneusement contrôlés et enregistrés afin d'assurer la constance de la qualité et les adaptations sont effectuées plus souvent en fonction des impératifs de temps de fabrication qu'à cause des variations des facteurs extérieurs qui sont maintenus à leur valeur optimum.

Il y a cependant toujours un grand risque à accélérer trop le temps de polymérisation, car on augmente alors le retrait et les tensions dans le stratifié.

Il est possible également de contrôler le cycle de polymérisation en modifiant la température extérieure au cours de celle-ci, soit pour accélérer certaines étapes de la fabrication polymérisation du gelcoat par exemple, soit pour mener le durcissement plus loin dans un temps plus court.

Ce processus n'est pratiquement plus utilisé pour la stratification des coques commerciales, en raison des installations et des manutentions supplémentaires qu'il requiert. En revanche, on utilise des étuves à cycle thermique contrôlé

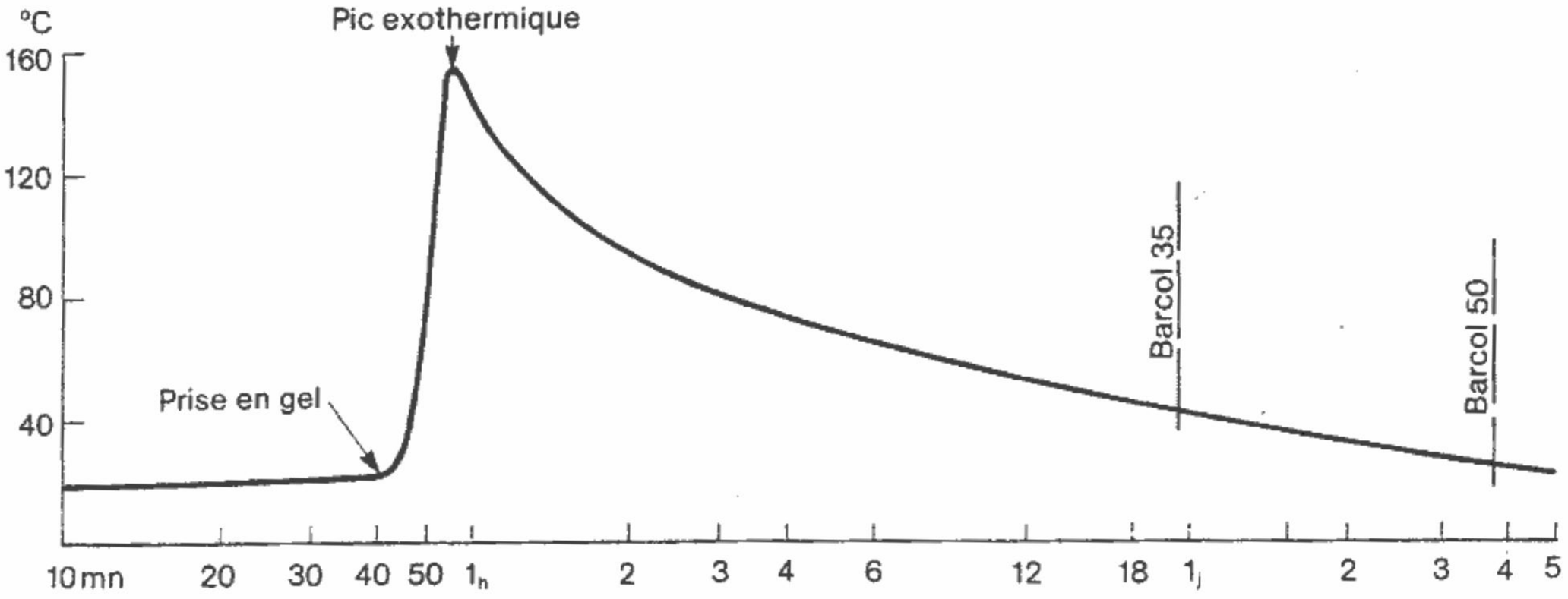


Fig. 5-19 • Courbe de température d'un stratifié au cours de la polymérisation de sa résine ; au bout d'une journée, la dureté (Barcol 35) permet le démoulage, mais la dureté 50 n'est atteinte qu'au bout de quatre jours et la polymérisation n'est pas encore achevée ; même lorsque la température aura atteint l'ambiante, le stratifié continuera à durcir pendant plusieurs mois.

très précisément pour la polymérisation de stratifiés spéciaux utilisant des renforts pré-imprégnés de résine, pour la réalisation d'éléments ou même de coques à hautes performances mécaniques.

TABLEAU 5/VI
ÉCHELLE DES CARACTÉRISTIQUES
DES RÉSINES POLYESTERS PURES DURCIES

Densité	1,10	-	1,46
Dureté Barcol	40	-	55
R_t daN/mm²	4	-	9
E_t daN/mm²	200	-	450
R_C daN/mm²	9		25
Allongement à la rupture %		≈	2,4
Retrait %	7	-	8,5
Absorption d'eau %	0,15	-	0,60

Parmi les meilleurs documents sur les résines et la stratification que l'on puisse trouver, il faut citer le *Polyester handbook* du fabricant britannique Scott Bader Sturge, 65, Rue Sully - 80000 Amiens.

Deux familles de polyesters sont utilisées en construction de plaisance, les polyesters orthophtaliques et isophtaliques. Les premiers sont un peu moins chers mais de qualité inférieure, tant sur le plan des caractéristiques mécaniques que sur celui de la résilience et surtout de la tenue en milieu aqueux. Les polyesters isophtaliques sont d'ailleurs les seuls qui doivent être utilisés dans la fabrication de la couche extérieure de résine colorée et protectrice, le gelcoat. Encore faut-il distinguer différents types de résines isophtaliques, certaines n'atteignant même pas les caractéristiques des meilleures résines orthophtaliques. Il semble qu'actuellement les meilleurs résultats sont obtenus avec des résines à base de neopentyl glycol (NPG).

Notons enfin qu'il existe des résines polyesters spécifiques de certaines caractéristiques, résistance au feu, compatibilité avec l'eau potable et les produits alimentaires, ou de certains usages, collage ou coulée (résines à l'eau pour blocage de lest ou remplissage de cavités).

• Les adjuvants des résines

Les résines pures sont additionnées d'un certain nombre de produits destinés à en modifier les caractéristiques physiques (viscosité, retrait, résistance à l'abrasion) ou chimiques (résistance à certains agents) ou tout simplement pour des raisons économiques.

La charge la plus couramment utilisée est la silice colloïdale, ou gel de silice, destinée à rendre la résine thixotrope, c'est-à-dire à l'empêcher de couler trop facilement sur des parois verticales. Dans ce cas, la proportion ne dépasse pas 1 à 2%.

Les charges utilisées pour allonger la résine sont en général du kaolin ou du talc. A une époque, certains constructeurs n'hésitaient pas à mettre jusqu'à 50% p.p. de ces charges. Aujourd'hui, heureusement, on en est revenu à des proportions plus sages. Car, si certaines charges améliorent certaines qualités des résines, il existe des proportions optimums, indiquées par les fabricants, dont il ne faut pas s'écarter.

D'autres charges permettent d'alléger la résine pour effectuer des remplissages, réaliser des congés, etc. On dispose ainsi, par ordre croissant de densité, de microfibres de pulpe de bois (d = 0,13 à 0,19), de microsphères inorganiques (d = 0,175) qui toutes deux peuvent être introduites dans la résine jusqu'à saturation, et de microballons de résine phénolique (d = 0,25) qui sont utilisés dans la proportion de 10 à 20% p.p.

Parmi les charges, il faut citer les pigments utilisés dans la coloration des gelcoats. En dehors de leurs qualités propres de coloration, d'opacité et de résistance à la lumière et aux agents atmosphériques, ils doivent être compatibles avec les constituants de la résine et résister à la chaleur de la polymérisation.

La plupart des pigments sont d'origine minérale et certains, comme l'oxyde de chrome, de couleur verte, apportent une dureté supplémentaire à la surface qui les fait parfois utiliser pour les moules de fabrication.

Le prix des pigments est extrêmement variable selon leur origine et peut, dans les rouges par exemple, atteindre des écarts de 1 à 10.

TABLEAU 5/VII
ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
DES RÉSINES POLYESTERS ORTHOPHTALIQUES ET ISOPHTALIQUES EN IMMERSION

	ORTHOPHTALIQUES			ISOPHTALIQUES		
daN/mm²	Témoin	100 jours	4 ans	Témoin	100 jours	4 ans
R_t	20,9	17,5	12,6	20,3	18,1	16,2
E_t	1300	1240	1100	1370	1290	1190
R_f	28,1	24,5	14,1	27,8	25,4	19
E_f	990	950	800	990	930	820

Il est bien évident que cette différence se retrouvera dans la tenue à la lumière, en particulier. Les blancs, les noirs et les bruns ont une meilleure tenue que les jaunes, certains rouges, les verts et leurs mélanges.

La proportion de pigment dans un gelcoat ne dépasse que rarement 5 % p.p. Les constructeurs ne colorent plus eux-mêmes la résine mais utilisent des gelcoats tout préparés.

Nous avons dit que l'humidité de l'air était un inhibiteur de la polymérisation. Ceci est un avantage en cours de stratification car elle permet à la résine en place de rester susceptible d'accrocher la couche suivante dans un délai convenable, on dit qu'elle est « amoureuse ». En revanche, lorsque l'on arrive à la dernière couche, il est nécessaire d'isoler celle-ci de l'air ambiant pour assurer sa parfaite polymérisation. Ce rôle d'isolant est assuré par de la paraffine utilisée soit en adjuvant de la dernière couche de résine, soit dans un gelcoat de finition. La présence de cette paraffine nécessitera un ponçage à cœur lorsque l'on devra procéder à des reprises de stratification, pour des collages par exemple.

b ▪ Les renforts

Le renfort le plus couramment utilisé dans le stratifié des voiliers de plaisance est la fibre de verre. Ce verre est un borosilicate de densité 2,54 dit de type E, ou « électrique », dont les matières premières, classiques en verrerie, sont le sable (silice), le kaolin, la dolomie (calcaire) auxquels est ajouté un fondant, la colémanite provenant exclusivement de Turquie.

La « composition » ainsi obtenue grâce à un dosage précis est enfournée en continu dans un compartiment de fusion, homogénéisée, puis affinée avant que la pâte ainsi élaborée soit débitée et formée en billes parfaitement régulières.

Ces billes sont soumises à une recuisson destinée à en éliminer les contraintes internes avant de les faire fondre dans un four-filière à induction. Le verre en fusion s'écoule par les trous d'une filière en alliage de platine, à la sortie de laquelle il est étiré à très grande vitesse (55 à 60 m/sec) par enroulement sur une broche.

Sur le trajet entre la filière et la broche, les filaments reçoivent un ensimage qui a diverses fonctions :

- agglomérer entre eux les filaments d'un même fil ;
- les revêtir d'une pellicule lubrifiante pour les opérations de tissage ultérieures ;
- favoriser leur liaison avec la matrice.

Le diamètre des filaments, de 5 à 13 microns, dépend de celui des trous de la filière et de la vitesse d'étirage. Le fil sans torsion ainsi obtenu est la silionne, base de tous les renforts qui seront utilisés en construction de plaisance.

Les caractéristiques mécaniques du filament unitaire varient entre son état vierge et après vieillissement.

La résistance à la rupture passe ainsi de 340 à 250 daN/mm², pour un allongement de 5 à 3,5 % environ donnant un module d'élasticité de 7 000 daN/mm².

Il existe un autre procédé d'élaboration qui donne un fil constitué de filaments non plus continus mais rompus sous l'action d'un jet d'air chassant le verre fondu à travers la filière. Le fil pelucheux obtenu, la verranne, n'est que rarement utilisé aujourd'hui, si ce n'est comme bourrage pour faire des congés dans les angles concaves.

La grosseur d'un fil est définie par deux unités, le décitex (poids en grammes de 10 000 m de fil) ou le denier (poids en grammes de 9 000 m). Un fil de 10 000 m pesant 140 g aura un « titre » de 140 dtex ou 126 deniers.

La résistance du fil, qui définira celle du renfort final, et sa souplesse varient en fonction de la finesse du filament de base. Plus celui-ci est fin, plus le fil sera résistant et souple.

ø du filament		5 µ	6-7 µ	9-10 µ	13 µ
Résistance du fil	g/denier	7,7	6,6	6,3	5,2
	daN/mm²	174	152	145	120

D'autre part, plus il est fin, meilleure sera sa liaison avec la matrice. Malheureusement, il sera plus délicat à tisser.

Le fil de base, coupé en longueurs de 5 cm maximum dispersées et assemblées par un liant, fournit la matière des mats. Les poids des mats couramment employés sont de 300, 450, 600 et, plus rarement 900 g/m². Plus le poids est élevé plus il est raide, difficile à mettre en forme et à imprégner. Les largeurs sont d'environ 1 m ou 2 m.

L'assemblage de plusieurs fils de base ou « bouts », dont la tension est équilibrée par un liant et sans torsion constitue le fil, ou mèche, de roving qui servira soit à la fabrication de tissus du même nom, soit au moulage par projection.

Dans ce procédé, le fil de roving est coupé dans une sorte de pistolet qui le projette sur le moule en même temps que les deux composants de la résine.

Le fil de roving est réservé à la fabrication des tissus lourds jusqu'à 1 000 g/m² environ.

Pour les tissus légers, on utilise plutôt des fils constitués de plusieurs bouts assemblés par torsion et sans liant. Mais ce sont les tissus de roving qui constituent l'essentiel des renforts tissés utilisés.

Les tissus sont ensuite souvent débarrassés des ensimages et lubrifiants divers nécessaires à leur tissage et revêtus d'un nouvel apprêt ou « finish » adapté au type de résine employée pour la stratification.

La qualité de cet apprêt est extrêmement importante pour l'accrochage de la résine et pour la reprise d'humidité éventuelle du stratifié. Il doit être adapté à chaque famille de résine.

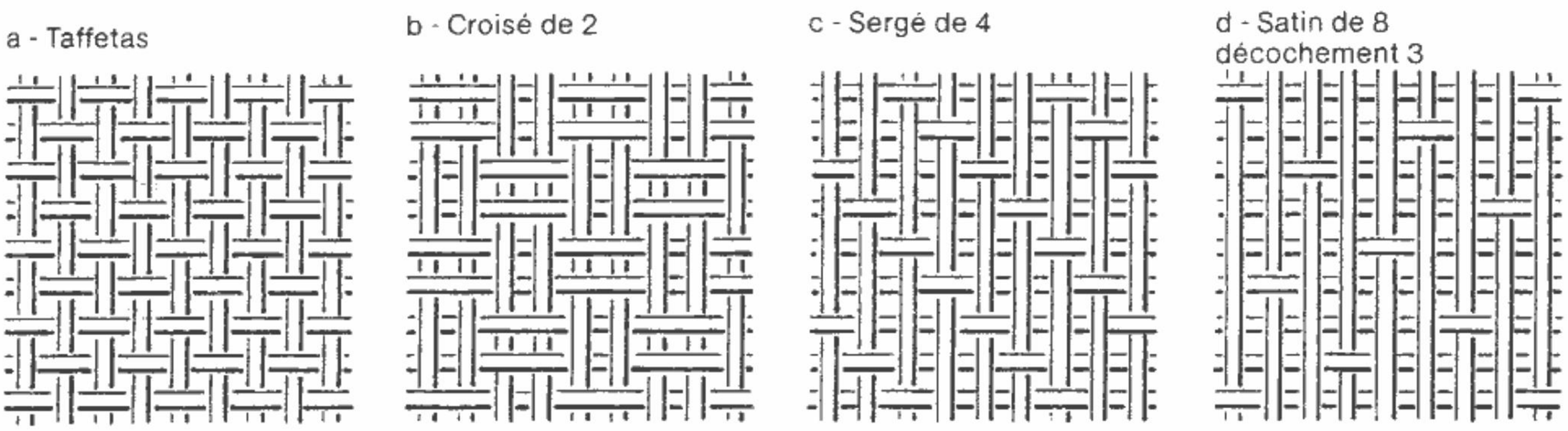


Fig. 5-20 • Différentes armures de tissus de verre.

La disposition du croisement des fils, ou armure, est extrêmement diverse et permet de faire varier l'équilibre en chaîne (en long) et trame (en travers) ainsi que la déformabilité du tissu, donc la drapabilité dans le moule. Moins les fils se croisent, plus le tissu est déformable et plat, donc moins il nécessite de résine pour être imprégné.

En revanche, les fils d'un tissu trop lâche seront difficiles à maintenir bien alignés et risquent de laisser des trous remplis d'une masse de résine, deux points particulièrement néfastes pour la résistance mécanique du stratifié. Le juste compromis dépendra de la surface, des formes à mouler et du soin, donc du temps que l'on voudra bien consacrer au moulage. A ce sujet, il est nécessaire de souligner l'importance du bon alignement des fils du tissu, ceux-ci étant particulièrement libres dans les armures lâches.

L'armure la plus simple est la *toile*, ou *taffetas*, dans laquelle les fils de chaîne et de trame se croisent alternativement (**FIGURE 5-20 a**).

Facile à manipuler, elle ne se déforme pas très aisément et, si elle est tissée serrée, elle peut être difficile à imprégner et nécessiter plus de résine en raison de sa plus forte épaisseur.

Lorsque le croisement s'effectue alternativement sur plus d'un fil, on a affaire à un tissu *croisé* de 2, 3 ou plus (**FIGURE 5-20 b**). Les croisés sont déjà plus déformables et plus plats que les toiles et taffetas.

Viennent ensuite les *sergés* et *satins* où un fil croise successivement un ou plusieurs fils (**FIGURES 5-20 c -d**). Le « décochement » est le décalage du croisement d'un fil de trame au suivant; il est de 1 pour les sergés, de plus de 1 pour les satins; le « flotté » étant la longueur de fil libre. Des deux, les satins sont les plus plats et possèdent donc l'épaisseur la plus faible et la plus grande drapabilité mais, leur tenue étant très lâche, ils sont les plus difficiles à manipuler et offrent le plus de risques de dérangement des fils.

Les poids de tissus les plus utilisés vont de 250 à 900 g/m² environ.

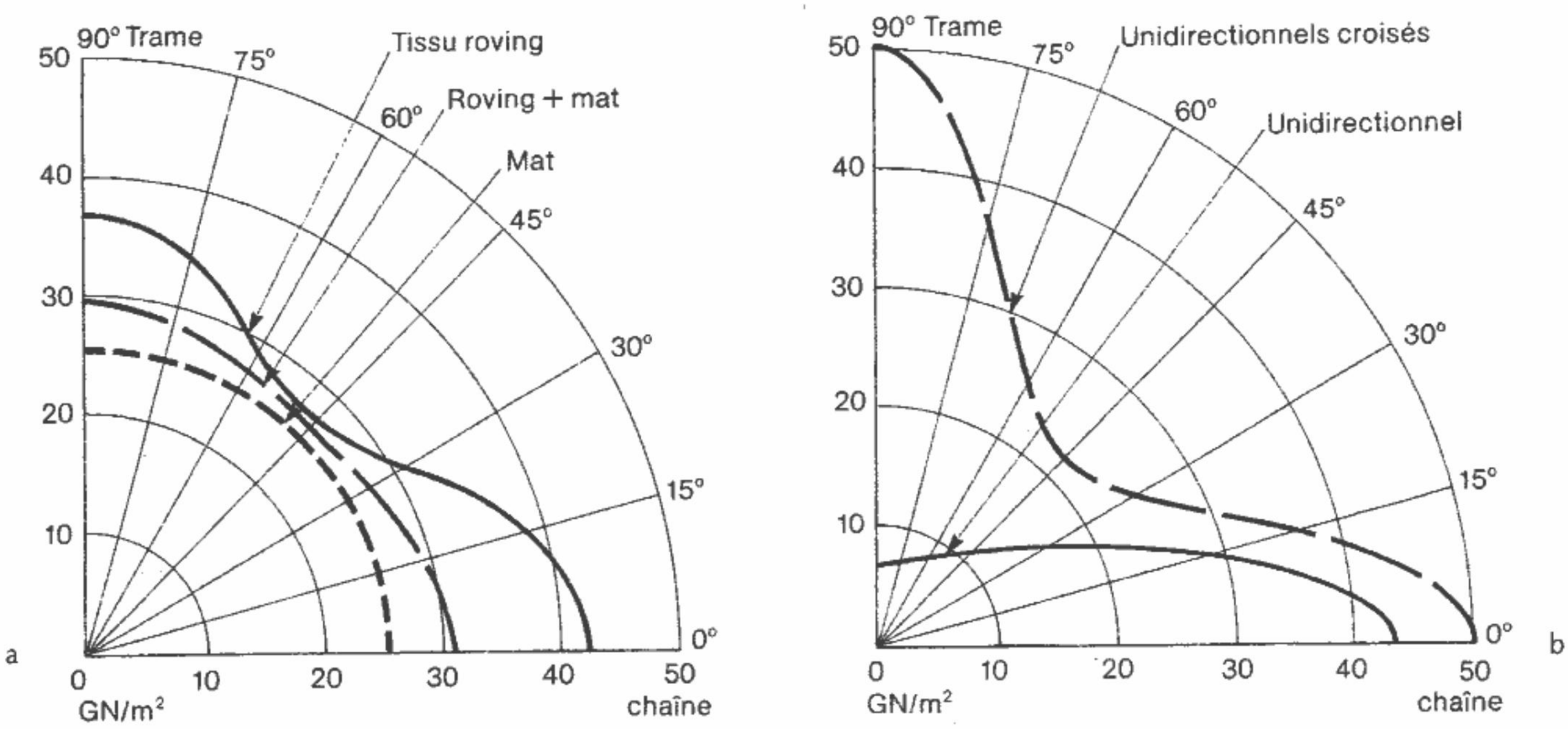


Fig. 5-21 • Polaires des résistances en traction de stratifiés armés de renforts différents; à droite, un unidirectionnel seul et deux unidirectionnels croisés.

On utilise de moins en moins les tissus de 1 000 g/m² et plus. La largeur est d'environ 1 m. Dans tous ces tissages, le rapport des titres entre chaîne et trame est voisin de 1, les caractéristiques du stratifié ainsi renforcé seront sensiblement égales dans les deux directions correspondantes (FIGURE 5-21 a).

Dans les tissus *unidirectionnels*, les fils de trame, très fins et espacés, parfois même remplacés par un ruban de colle, ne servent qu'à maintenir l'assemblage des fils de chaîne. Les caractéristiques du stratifié seront alors maximum dans ce sens et réduites pratiquement à celles de la matrice dans l'autre (FIGURE 5-21 b). Deux épaisseurs d'unidirectionnels croisés auront cependant des caractéristiques supérieures à un tissu équilibré de même poids total au mètre carré, du fait de l'absence de tout croisement. Malheureusement, il est très difficile de conserver l'arrangement des fils parfaitement parallèle lors de l'imprégnation, et c'est pourquoi ce type de renfort est souvent réservé à des rubans destinés à des renforcements locaux tels que dessus de raidisseurs ou varangues.

Une amélioration au défaut des unidirectionnels est apportée par les tissus *haut module* ou *multiaxiaux* qui sont constitués par la superposition de deux ou plusieurs unidirectionnels, disposés à 90° ou selon plusieurs axes, et dont la cohésion est assurée par le croisement des seuls fils fins de liaison. Leur prix semble en restreindre l'emploi, ce qui est malheureux car ils représentent la meilleure solution pour obtenir à la fois les meilleures caractéristiques mécaniques et la plus grande facilité de mise en œuvre.

Dans le cas où une cohésion transversale du stratifié est spécialement nécessaire en raison de risques de délaminage on utilisera des tissus de roving dont une ou les deux faces comportent des fils tirés formant bouclettes, ce sont les *spun roving*.

On trouve enfin des renforts composites obtenus par l'aiguilletage d'un mat sur un tissu de roving (*Fabmat* *) ou d'unidirectionnel (*Linrovmat* *), la répartition des poids de chacun étant choisie dans une proportion de 1/3 - 2/3 environ, 300 + 600 g/m² ou 450 + 900 g/m² par exemple. Permettant l'imprégnation de deux renforts en une seule opération, ils ont cependant l'inconvénient d'être difficilement déformables et sont réservés plutôt à des surfaces peu galbées.

Un autre type de renfort à base de fibres est le feutre constitué de fibres polyesters maintenues par un liant soluble dans le styrène et imprégné de microsphères plastiques qui occupent environ 50 % du volume pour la qualité XX et 55 % pour la qualité XM.

Fabriqué par *Firet* ** sous la marque *Coremat*, ce feutre existe en cinq épaisseurs de 1 à 5 mm sur une largeur de 1 m environ, et permet de réaliser des structures sandwich minces.

* Marques des renforts fabriqués par *F.G. Industries* en Grande-Bretagne.
** Commercialisé en France par *Chomarat*, 7, Rue Roy, 75008 Paris.

Mais, contrairement aux matériaux utilisés habituellement pour l'âme de ceux-ci, il s'imprègne de résine ce qui lui confère une grande résistance au cisaillement.

On peut superposer plusieurs couches de feutre, mais la proportion de catalyseur doit être progressivement réduite (jusqu'à 25 % pour une épaisseur de 11 à 15 mm) pour éviter l'élévation trop forte de température lors de cette polymérisation en masse.

Les renforts de mat et de tissus doivent répondre à un certain nombre de normes entrant dans la classification NF B 38-XXX qui ne présentent guère d'intérêt que pour les tisseurs.

Par ailleurs le Centre de promotion des composites, 65, Rue de Prony - 75854 Paris Cedex 17 est l'organisme auprès duquel on peut obtenir tous renseignements.

Il organise chaque année les **Journées européennes des composites**, source importante de documentation.

c ▪ Constitution du stratifié

Le stratifié monolithique de la majorité des coques de voiliers doit répondre à un certain nombre de critères mécaniques et d'aspect.

Il doit offrir une résistance à la rupture et au choc et une raideur en rapport avec les contraintes auxquelles il sera soumis ; présenter une bonne cohésion transversale pour éviter les délaminages sous flexion malgré sa structure bidimensionnelle ; absorber le moins possible d'humidité pour éviter de se dégrader par le phénomène plus ou moins improprement appelé « osmose » ; présenter un aspect parfaitement lisse exempt de tout relief des tissus de renfort ; enfin, être facile à mettre en œuvre et aussi économique que possible.

Certaines de ces caractéristiques sont obtenues par le choix, la combinaison et la disposition des renforts, d'autres par leur mise en œuvre. La résistance à la rupture en traction seule est obtenue par la résistance propre du fil dans la direction de l'effort. Elle conduira donc à l'emploi d'unidirectionnels.

La résistance en flexion et la raideur dépendent de l'épaisseur du stratifié et de la résistance en compression de la face de celui-ci située du côté de l'effort et en traction sur la face opposée. Elles nécessitent également une bonne résistance au cisaillement interlaminaire cause de délaminage.

L'épaisseur sera obtenue par l'emploi de renforts offrant le maximum d'épaisseur, une fois imprégnés, pour un poids de verre donné, c'est le cas des mats.

Ceux-ci résistent également bien à la compression et présentent le maximum de cohésion transversale.

La résistance au choc demande une isotropie aussi bonne que possible du matériau. Ici encore, c'est le mat qui assurera le mieux cette fonction.

TABLEAU 5/VIII

CARACTÉRISTIQUES DES FEUTRES FIRET COREMAT IMPREGNES DE RÉSINE POLYESTER INSATUREE

	1 mm	2 mm		3 mm		4 mm		5 mm
	XX	XX	XM	XX	XM	XX	XM	XX
Poids à sec g/m²	33-40	63-77	90-110	93-114	120-140	124-152	160-180	151-184
Poids de résine Kg/m²	0,6	1,2	1	1,8	1,5	2,4	2	3
Ep. imprégné mm	1,2-1,6	1,9-2,5	1,8-2,4	2,8-3,7	2,8-3,5	3,6-4,7	3,8-4,5	4,3-5,6

	d	daN/mm²									
		Rt longitudinal	Et	Rt transversal	Et	Rf	Ff	Rc (10%)	Cc	Rg	G
XX	0,6-0,9	0,38	60	0,23	35	0,85	85	0,7	20	0,25	5
XM	0,5-0,6	0,3		0,2		0,75	80	1		0,25	5

L'absorption d'eau dépend de l'ensimage des fibres de renfort, du choix des résines de gelcoat et d'imprégnation, de leur mise en œuvre et, en particulier, de l'attention apportée au contrôle de l'humidité dans les ateliers. La condensation sur un moule ou des renforts froids pénétrant dans un atelier chaud ainsi que l'emploi de gelcoats « maison » à base de résine orthophtalique sont le plus sûr moyen, pour un constructeur, de connaître à plus ou moins brève échéance des problèmes d'osmose.

Si, pour une raison accidentelle, la barrière du gelcoat venait à être entamée, il faut éviter que l'humidité puisse s'infiltrer le long des fibres. Deux éléments peuvent y contribuer : la qualité du traitement d'ensimage de celles-ci et leur longueur, ce dernier point étant réalisé par l'emploi du mat.

L'aspect de surface du stratifié dépendra de celui du moule dont le gelcoat fournira le reflet, des conditions d'application de celui-ci, de son épaisseur, de son degré de polymérisation lors de l'application des premiers renforts, de la composition et de la compatibilité de leur résine d'imprégnation avec celle du gelcoat, enfin du type de renfort utilisé. Ici encore, le mat peut constituer un écran évitant de voir apparaître le dessin des tissus.

Par ailleurs le mat étant gros absorbeur de résine, il donne au stratifié de l'épaisseur, donc de la raideur. Tous ces avantages font qu'il constitue un élément important du stratifié à condition d'être utilisé à bon escient.

Une fois choisis le poids de verre et les types de renforts, mat et tissus, le nombre de couches selon lequel ils seront répartis, et par conséquent le grammage de celles-ci et le type de tissu, détermineront la facilité de mise en œuvre en fonction de la forme à mouler et le prix de revient.

On peut être tenté d'utiliser des renforts lourds pour réduire le nombre des opérations, mais il ne faut pas oublier qu'ils seront plus difficiles et donc plus longs à draper et à imprégner, nécessitant de ce fait une résine à temps de gel plus retardé.

Le temps total demandé par la stratification ne sera donc pas forcément plus court et la qualité a de fortes chances de s'en ressentir en raison, en particulier, des difficultés d'ébullage. Il y a là un compromis que seule l'expérience du chantier permet d'optimiser.

Par ailleurs, le choix du type de renfort déterminera le poids de résine nécessaire à son imprégnation ainsi que l'épaisseur obtenue.

A titre d'indication le mat ou la fibre projetée nécessiteront entre 2,5 et 3 fois leur poids en résine et un mat de 300 g/m² donnera une épaisseur d'environ 0,85 mm. Un tissu de roving absorbera, selon son armure, entre 1 et 1,5 fois son poids et l'épaisseur d'un roving de 500 g/m² sera de 0,8 mm environ. Pour chaque interface entre deux renforts, on déduira 0,2 mm. Les graphiques de la FIGURE 5-22 permettent de calculer l'épaisseur d'un stratifié en fonction de son poids et de son pourcentage de verre, ou son poids de verre en fonction de son épaisseur et de son pourcentage de verre. Pour plus de précision on peut utiliser la formule :

$\mathbf{e = P/1\,000 \cdot d}$

où **e** = épaisseur en mm

P = poids en g/m²

d = densité

L'épaisseur totale **E** est la somme des épaisseurs des divers constituants.

Suite du texte page 56.

LE CLOQUAGE DES COQUES

DURANT les dernières années, un phénomène est apparu qui a fait craindre que la durée de vie des coques en plastique armé pourrait être plus réduite qu'on ne le pensait.

L'émergence d'un nombre significatif de cas de cloquage s'est révélée, essentiellement dans les pays anglo-saxons, dans la première moitié de la décennie soixante-dix pour atteindre des proportions de 1 à 2% du nombre des unités construites, selon les constructeurs, dix fois plus selon les experts et les chantiers de réparations.

Le phénomène était en tout cas suffisamment alarmant pour que des enquêtes et des études soient entreprises par la SBBNF (*Ship and Boat Builders National Federation*) en Grande-Bretagne, par la NMMA (National Marine Manufacturers Association) aux États-Unis, ou par l'ICOMIA (*International Council of Marine Industry Association*) au niveau international.

Aux États-Unis l'étude, effectuée à la demande des US Coast Guards, a reconnu que plus de 5% des unités construites étaient touchées mais qu'il n'y avait pas d'atteinte à la structure même de la coque.

En France, le problème, en dehors du cas des navires importés, n'a atteint une valeur significative que dans la seconde moitié de la décennie soixante-dix, suivi d'une rémission et d'une réapparition dans les deux ou trois dernières années. Cependant, il est loin d'avoir atteint l'ampleur des cas précédents puisqu'une enquête (1985) de la FIN (*Fédération des Industries Nautiques*) auprès des constructeurs et des experts, et représentant environ les deux tiers de la production française des cinq dernières années, donne un chiffre compris dans une fourchette de 0,14 à 0,20% du nombre des unités construites.

QUE COUVRE LE PHÉNOMÈNE?

Le cloquage des carènes des coques en stratifié peut revêtir de multiples aspects et être dû à un nombre de causes que l'on ne peut encore évaluer, tant elles sont nombreuses.

En dehors de la dimension, qui peut aller de quelques millimètres à plusieurs centimètres, de leur répartition, homogène ou localisée, de leur forme, qui peut être un des éléments permettant d'en diagnostiquer la cause, les cloques peuvent se situer à trois niveaux de l'épaisseur du bordé.

Entre l'antifouling et le gelcoat, elles relèvent des classiques problèmes de peinture — surface ni sèche ni propre, mauvais mélange des composants, impuretés, solvant trop abondant ou inadapté — compliqués par la répartition spécifique des surfaces et par la présence des sous-couches de primaires nécessaires à l'accrochage des peintures. A ce stade, les cloques ne contiennent en général qu'une eau plus ou moins saumâtre et le remède ne se situe qu'au niveau de l'élimination de la peinture défectueuse par des procédés mécaniques légers (microbillage) et surtout sans décapant, par une reprise éventuelle du gelcoat, et une nouvelle ligne d'opérations de traitement et de peintures avec des produits et dans des conditions adéquates.

Entre le gelcoat et le stratifié proprement dit, elles peuvent être dues à des causes multiples liées à la qualité du gelcoat et de sa mise en œuvre : résine de basse qualité, pigments ou adjuvants hydrophiles, proportion de diluant trop importante, microbulles d'air, épaisseur trop faible et irrégulière ou trop forte entraînant des fissurations, application trop rapide du premier mat entraînant une dissolution du gelcoat et son transpercement par les fibres de verre, ou à des traitements inadéquats pour l'accrochage des antifoulings, toutes causes réduisant l'imperméabilité de cette couche de résine qui possède, en plus de sa fonction esthétique, celle d'isoler le stratifié du milieu extérieur.

C'est à ce stade que les phénomènes d'osmose peuvent apparaître.

L'osmose est un phénomène physique dans lequel une solution à forte concentration absorbe, à travers une paroi semi-perméable, un solvant (dans notre cas, l'eau) tendant ainsi à égaliser la concentration de la solution de part et d'autre de la paroi. Le volume, et de ce fait la pression, de la solution concentrée augmenteront, cette dernière pouvant atteindre 6 à 7 kg/cm², provoquant la déformation de la paroi.

Mais pour que l'osmose puisse se développer, il faut tout d'abord que la paroi (le gelcoat en l'occurrence) ne soit pas imperméable et ensuite que l'eau qui, dans un premier temps pénètre par capillarité ou est

PROBLÈME D'OSMOSE

déjà présente dans le stratifié, trouve des produits à dissoudre par hydrolyse, permettant la formation d'une solution à haute concentration.

Ces produits se trouvent soit dans le gelcoat lui-même, soit dans la résine ou ses adjuvants constituant la matrice du stratifié, soit dans les composants du liant assurant la liaison entre la résine et la fibre de verre ou entre les fibres du mat. La qualité des produits primaires et leur mise en œuvre (contrôle de l'hygrométrie et de la température, en particulier) seront responsables de la présence de ces indésirables.

La description du phénomène de l'osmose explique pourquoi les bateaux naviguant en eau douce en sont autant sinon plus victimes (puisque la différence de densité des solutions est plus grande). De même la réduction de la durée du séjour dans l'eau n'empêchera pas l'évolution du processus, puisque la concentration de la solution continuera à s'élever durant le séjour à terre entraînant une osmose d'autant plus brutale lors du retour à l'eau.

Les cloques relevant de l'osmose sont reconnaissables à la pression qui y règne et provoque un véritable jet lorsqu'on les crève, et à l'acidité du liquide (Ph < 6) qui dégage une odeur de vinaigre. Une protection des yeux est indispensable lors des travaux de réfection.

Dernier cas, enfin, les cloques se développent à l'intérieur même du stratifié. Ce cas est généralement lié à une absorption de l'eau par capillarité le long de fibres de verre émergeant à l'extérieur du stratifié. Il est beaucoup plus rare et relève essentiellement de la fabrication du stratifié : gelcoat trop mince, insuffisamment polymérisé avant l'application des couches suivantes, résine de renfort trop diluée en styrène qui ramollit le gelcoat, liant du mat mal adapté, accompagnés de mauvaises conditions d'hygrométrie et de température, de contrôle de la polymérisation et de la régularité du rapport verre/résine, etc.

L'utilisation, ces dernières années, de résines à bas pic exothermique, à temps de vie en pot allongé, (pour permettre une stratification en continu de fortes épaisseurs), semble avoir eu des conséquences graves. Ces résines sont en effet beaucoup moins tolérantes quant à la précision de leur température de polymérisation et l'on a pu constater des chutes importantes des caractéristiques mécaniques. L'amélioration de la productivité par ce moyen semble incompatible avec le maintien de la qualité.

PRÉVENTION DU CLOQUAGE

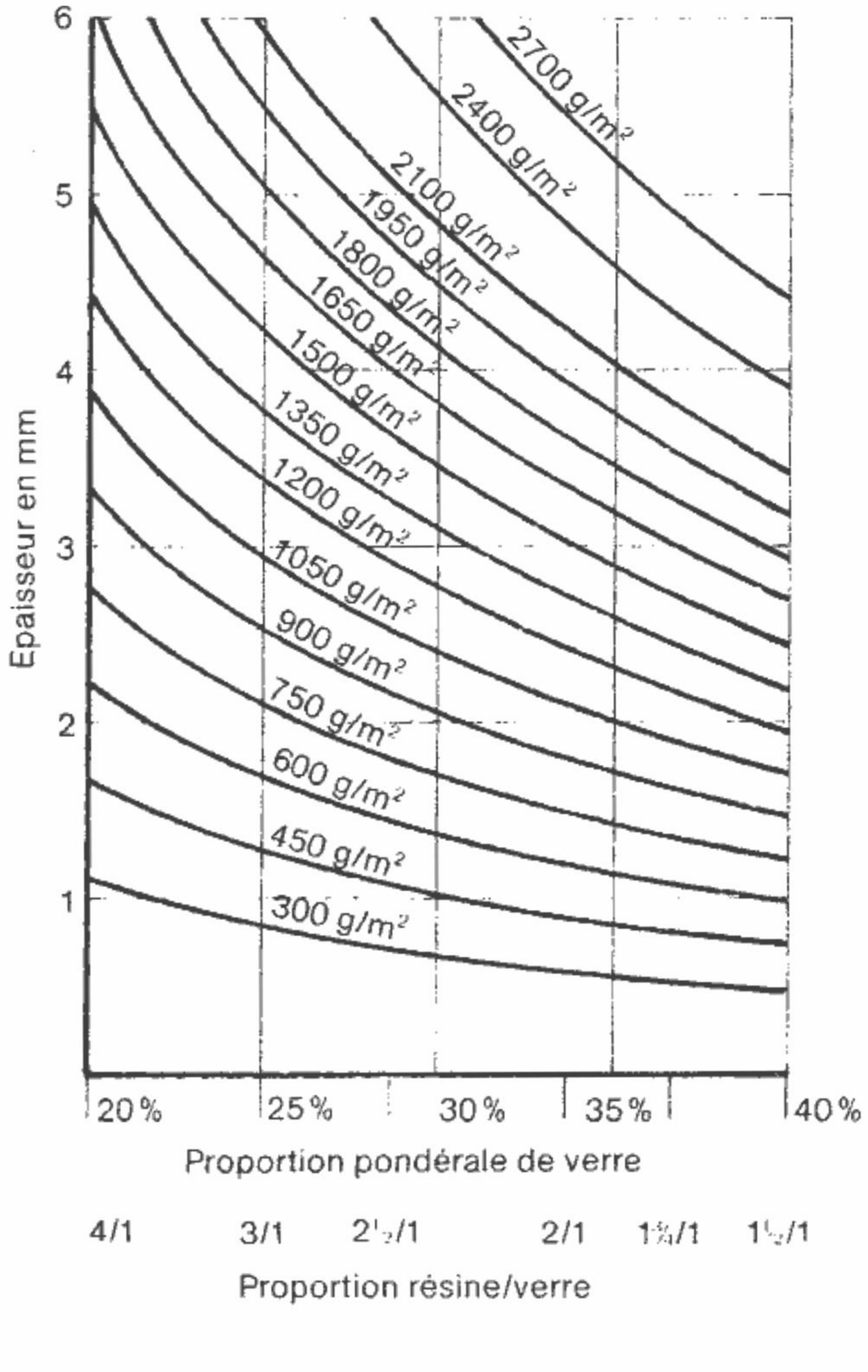
Il est bien évident que celle-ci se situe tout d'abord au niveau des produits utilisés dans la fabrication du stratifié, gelcoat, résine et ses adjuvants *, renforts, tant en ce qui concerne leur qualité propre et leur fiabilité que dans leur adéquation au milieu aqueux.

Elle tient ensuite à leur mise en œuvre. Cependant, les paramètres de celle-ci étant maintenant relativement bien connus et maîtrisés par la plupart des constructeurs français qui ont procédé à de lourds investissements pour se doter des équipements nécessaires, c'est dans le domaine des produits eux-mêmes que les recherches actuellement en cours se développent. Car il n'est absolument pas prouvé, ainsi que le montre le faible pourcentage de bateaux concernés construits en France, qu'un stratifié de qualité n'ait pas une durée de vie convenable et nécessite un traitement quelconque de prévention. Aux États-Unis, l'ABBRA (*American Boat Builders and Repairers Association*) vient de recevoir des Coast Guards une subvention de 60 000 $ qui sera consacrée à une étude menée par l'Université de Rhode Island.

Néanmoins, afin d'assurer une garantie supplémentaire, certains constructeurs ont adopté un système de protection supplémentaire consistant en l'application d'une résine isolante (généralement à base d'époxy) entre le gelcoat et la première couche de renfort.

L'institution d'un contrôle de qualité sévère, depuis la réception de tous les produits entrant dans la fabrication du stratifié jusqu'à l'application des peintures antisalissures en passant par tous les stades de la mise en œuvre est indispensable pour éviter toute surprise désagréable dans ce domaine. ■

* On a découvert ainsi que la présence de dyéthylène glycol dans le catalyseur empêchait une polymérisation complète et était l'une des causes d'osmose.



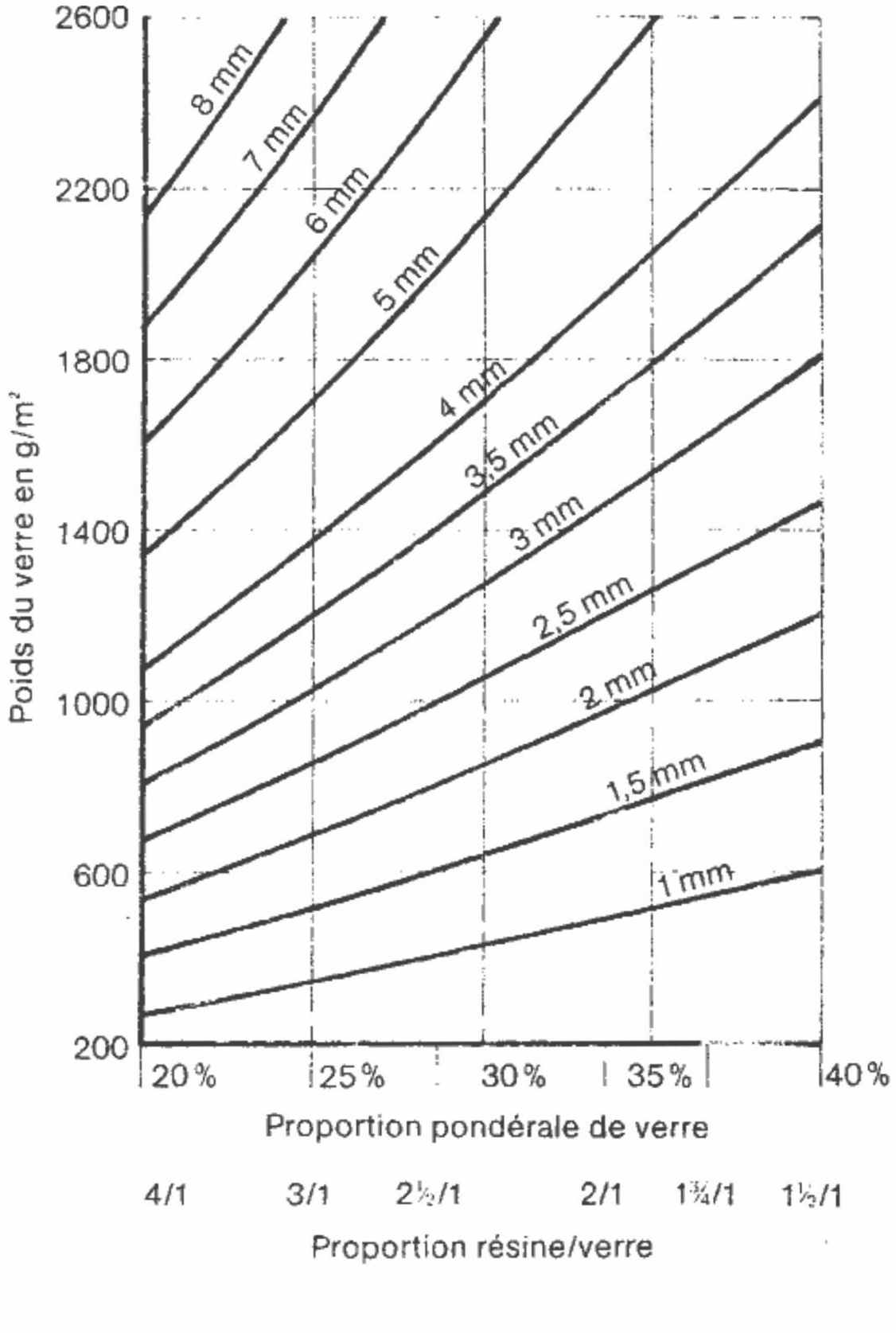


Fig. 5-22 • Épaisseur du stratifié en fonction du poids E et de la proportion résine polyester/verre. (*D'après doc. Fiberglass Ltd*).

Exemple : soit un stratifié constitué de :

2 mats de 300 g/m² } densité 2,54
2 roving de 600 g/m² }

résine polyester, densité 1,2
proportion résine/mat 3/1 p.p.
proportion résine/roving 1,5/1 p.p.
charge, densité 2,5
proportion de charge ajoutée à la résine 20 % p.p.

On aura par mètre carré de stratifié :

Poids du mat :	2 x 300	=	600 g
Poids du roving :	2 x 600	=	1 200 g
Poids total de verre :			1 800 g
Poids de résine dans le mat :	600 x 3	=	1 800 g
Poids de résine dans le roving :			
	1 200 x 1,5	=	1 800 g
Poids total de résine			3 600 g
Poids de la charge :	3 600 x 20/100	=	720 g
Poids total du stratifié			
	1 800 + 3 600 + 720	=	6 120 g

Épaisseur pour le verre	1 800/2 540	=	0,71
Épaisseur pour la résine	3 600/1 200	=	3
Épaisseur pour la charge	720/2 500	=	0,29
Épaisseur totale			4 mm

Le poids des divers composants permet par ailleurs de calculer le prix matière du stratifié.

La feuille de calcul P.E. stratifié permet d'effectuer rapidement le calcul approché.

Les critères que nous venons d'étudier conduisent à une composition de stratifié de coque que l'on retrouve pratiquement chez tous les constructeurs français. Après un gelcoat isophtalique dont l'épaisseur varie entre 0,3 et 0,8 mm, on trouve un ou deux mats de 300 g/m² ou une projection de fibre coupée par pistolage d'un poids de verre équivalent suivis d'une alternance de tissus de roving et de mat, 600 + 300 ou 800 + 450, se terminant soit sur le tissu, soit sur le mat selon l'aspect de surface désiré. Les poids indiqués varient légèrement selon les fournisseurs.

Pour les éléments ne travaillant presque uniquement qu'en flexion comme les contre-moulages, l'essentiel est constitué par du mat, un tissu léger n'intervenant qu'en dernière couche.

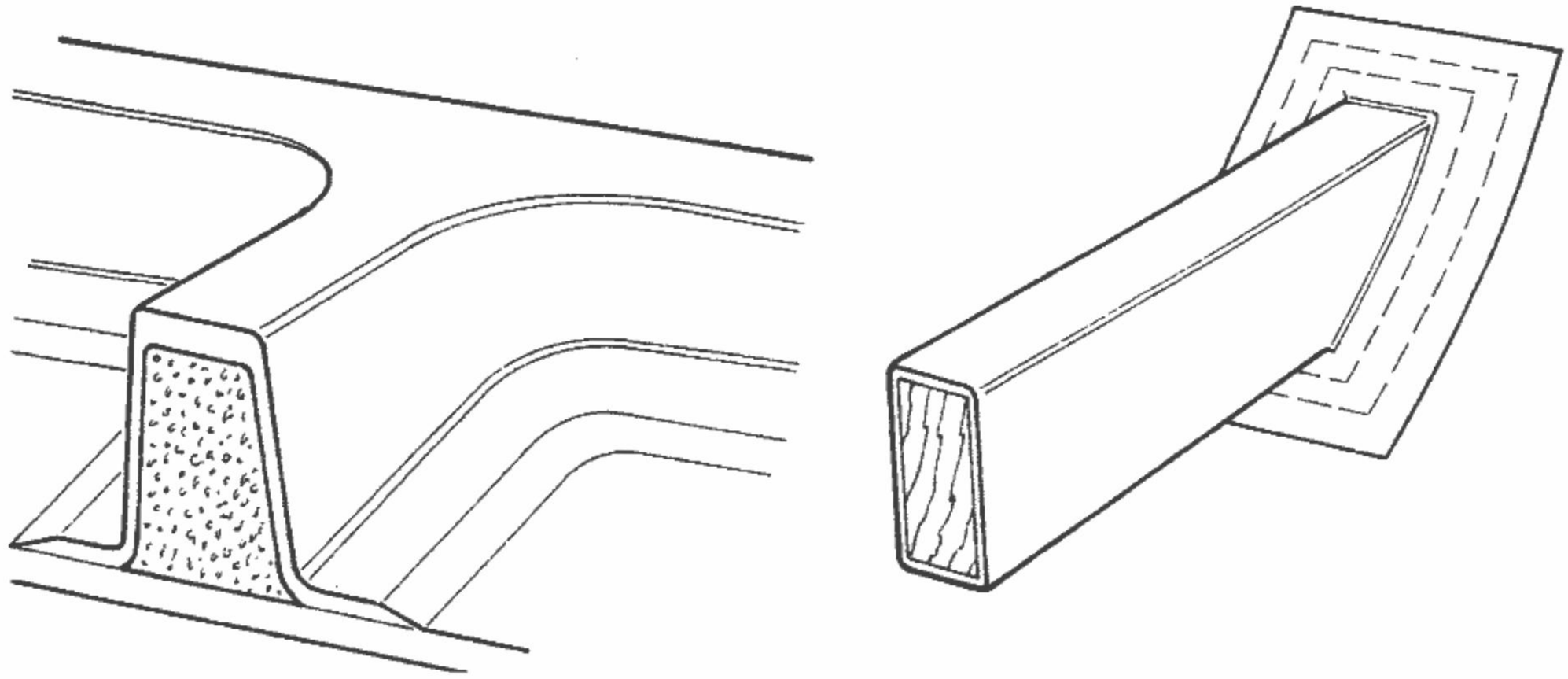


Fig. 5-23 • Terminaisons de varangues ; à gauche, dans un contre-moulage, à droite, élément bois stratifié.

On voit que dans ces constructions, le mat est employé en première couche pour ses qualités au niveau de la résistance en compression et au choc, de la reprise d'humidité et de l'aspect. Dans les couches intermédiaires, il assure la résistance au cisaillement et la cohésion interlaminaire alors que les tissus confèrent la résistance en traction.

L'utilisation d'un tissu mixte verre/kevlar, en combinaison avec des renforts classiques permet un léger gain de poids en même temps qu'une amélioration des caractéristiques en traction et flexion et surtout au choc.

Ainsi, sur un Sun-Fizz de Jeanneau, il a été possible, en remplaçant 5 couches de mat de 450 et 3 couches de roving de 1 000 par 2 couches de mat 300, 2 de mat 450, 1 roving 1 200 et 2 mixtes verre/kevlar à 25 %, de gagner 10 % en poids pour une amélioration de 5 % en traction, 8 % en flexion et 45 % au choc.

Les résultats devraient être encore supérieurs avec du polyéthylène HPPE.

Pour tenir compte des contraintes de torsion dans la partie centrale il serait tout à fait envisageable, tout au moins pour les grandes unités, de remplacer une partie des tissus de roving placés en long par des unidirectionnels croisés ou des tissus haut module disposés à 45° de l'axe.

Un des gros avantages du stratifié est de permettre toutes les adaptations possibles aux besoins mécaniques et en particulier d'en faire varier l'épaisseur en n'importe quel point de la coque. Ces variations doivent cependant s'effectuer de façon progressive. On admet que le décalage entre deux suppressions de renfort doit être d'environ 10 mm pour 100 g de verre ou six fois la différence d'épaisseur. Ainsi le décalage entre un mat de 300 g/m² et le renfort qui lui est adjacent sera de 30 mm.

d ▪ Raidisseurs et sandwichs

On retrouve dans la structure des coques en stratifié des éléments communs à tous les matériaux, lisses, membrures, varangues, etc. Ceux-ci peuvent être soit réalisés *in situ* lors de la stratification de la coque, soit incorporés à des contre-moulages ou moulés indépendamment et rapportés par collage, cette dernière solution étant certainement la plus critiquable.

Les raidisseurs inclus au moulage sont stratifiés sur un matériau n'ayant pas de résistance propre et destiné uniquement à leur donner une forme. Il doit être inerte vis-à-vis de la résine et ne pas risquer de faire éclater le stratifié en cas de gonflement dû à une reprise d'humidité. C'est pourquoi le bois massif doit être utilisé avec la plus grande circonspection et en tout cas ne pas être percé de trous communiquant avec l'extérieur.

Les matériaux les plus utilisés pour l'âme de ces renforts sont la mousse de polyuréthanne qui permet d'obtenir des sections rectangulaires ou trapézoïdales appelées oméga et les demi-tubes de carton ou de PVC qui donnent des renforts demi-ronds. Les premières permettent de mieux disposer les matériaux en donnant plus d'épaisseur à la paroi supérieure, favorable à l'augmentation du moment d'inertie, qu'aux parois latérales.

Ces raidisseurs peuvent bien sûr être aussi inclus dans un contre-moulage. C'est souvent le cas pour le varangage ou pour des membrures recevant des cloisons.

Comme pour tout autre matériau, les extrémités des renforts ne doivent pas pouvoir provoquer de points durs. Elles devront donc se terminer de façon aussi progressive que possible, sur un autre élément de structure, perpendiculaire de préférence.

Lorsque cela ne sera pas possible, un renfort local étagé sera interposé entre l'extrémité du raidisseur et la paroi sur laquelle il s'appuie (FIGURE **5-23**). On utilisera au maximum la souplesse de dessin que permet le stratifié.

Certains raidisseurs sont obtenus par le dessin de nervures intégrées à la décoration du bateau. Leur réalisation en est toujours délicate au moment de la stratification et certaines précautions doivent être prises pour qu'elles puissent remplir

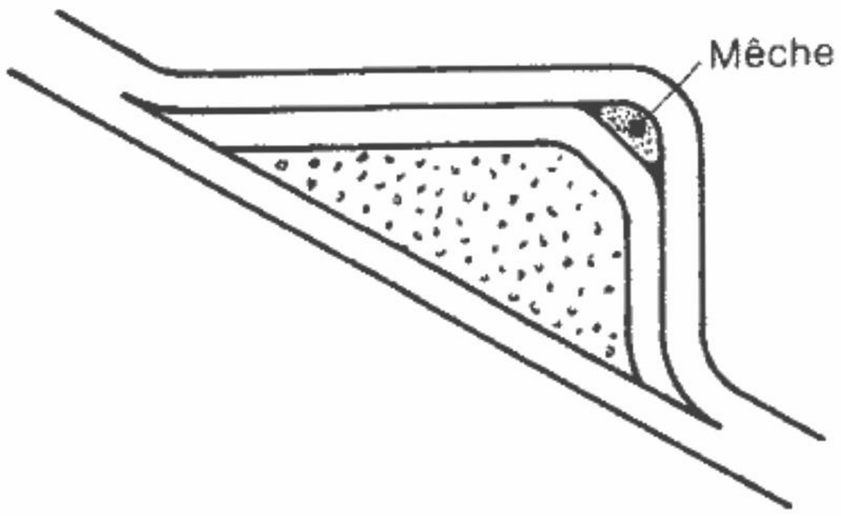


Fig. 5-24 • Renforcement des nervures.

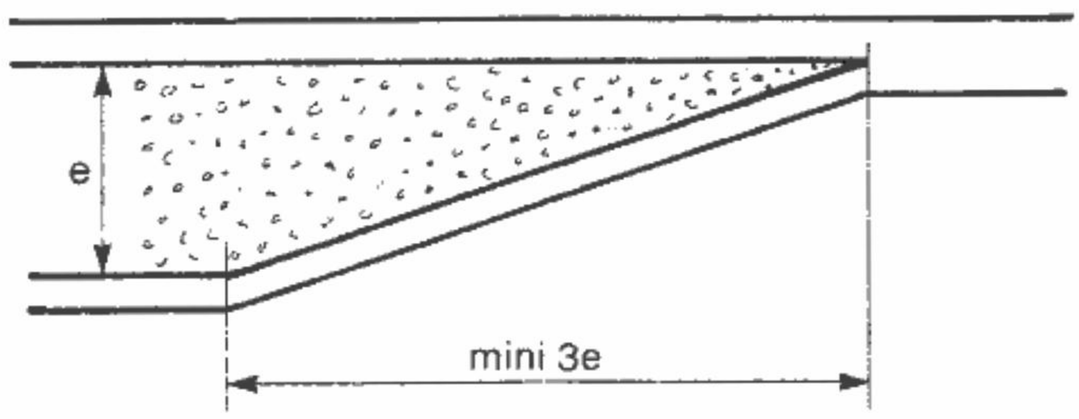


Fig. 5-25 • L'âme d'un sandwich doit toujours se terminer par un chanfrein au moins égal à trois fois l'épaisseur.

leur rôle et ne pas constituer un point de faiblesse en flexion transversale par effet de « charnière ». S'il n'est pas possible d'effectuer une projection de fibres coupées, on prévoira dans l'angle une mèche de verranne avant la pose du premier mat pour former un congé qui réduira les risques de bulles derrière le gelcoat. Après la pose de la moitié en poids des renforts, des bandes seront disposées dans la nervure pour compléter l'épaisseur. Le vide sera ensuite comblé par une latte de mousse parfaitement arasée ou par un mastic de remplissage allégé (micro-billes ou micro-ballons) avant de terminer la stratification générale (FIGURE **5-24**).

Un autre procédé de renforcement est représenté par l'adoption d'une structure sandwich.

Celle-ci peut être employée pour le bordé d'une coque mais, en construction de série, elle est plutôt réservée au raidissement des surfaces non ou peu galbées, ponts et toits de rouf, fonds de cockpit, où elle permet de se dispenser d'un barrotage.

Nous ne reviendrons pas ici sur le calcul des structures sandwich, mais il est bon de préciser quelques points concernant leur dessin et leur implantation dans le stratifié.

Tout d'abord, le lien entre le stratifié des peaux et l'âme doit toujours être assuré par un mat, généralement de 300 g/m², sur chaque face pour obtenir la meilleure cohésion possible. Baltek fournit maintenant une variété de balsa Contourkore pré-imprégné, l'AL 600, afin de limiter l'absorption de résine et faciliter l'accrochage. La peau située sur la face devant supporter la pression peut être entièrement renforcée de mat puisqu'elle travaillera en compression. En revanche, les tissus constitueront la majorité des renforts de l'autre face.

Dans tous les endroits où le sandwich est soumis à une compression transversale (fixation de pièces d'accastillage par exemple) l'âme sera remplacée par un rempli en matériau dur, contreplaqué marine, voire stratifié massif.

L'âme sera supprimée également sur tous les pourtours des surfaces comme les entourages des ponts au niveau de la liaison avec la coque ou lorsque la surface fait un angle brusque, hiloire de rouf, quille par exemple. Le passage du sandwich au stratifié monolithique doit se faire le plus progressivement possible avec un minimum de trois fois l'épaisseur de l'âme. Le chanfrein peut être taillé directement dans celle-ci ou être constitué d'une latte triangulaire rapportée (FIGURE **5-25**).

e ▪ Assemblages et collages

L'assemblage des divers éléments constituant la structure d'un voilier en plastique armé doit assurer la continuité de celle-ci afin que toutes les contraintes auxquelles elle est soumise soient transmises de façon aussi uniforme et complète que possible. Les collages assurant ces liaisons doivent donc être suffisamment souples pour supporter les déformations inévitables et leur surface doit correspondre aux efforts à passer sachant que, effectués après polymérisation des éléments à assembler, leur tenue sera toujours inférieure à la cohésion transversale de ceux-ci.

On rencontrera deux types de collages qui, parfois, se compléteront : le collage face contre face et la reprise de stratification.

Dans le collage face contre face, chacune de celles-ci pourra correspondre soit à un gelcoat, soit à un envers de stratifié. Dans les deux cas, un ponçage à cœur sera nécessaire pour éliminer toute trace d'agent de démoulage ou de paraffine et, si possible, atteindre les renforts de verre. Malgré cela le contact entre les faces ne sera jamais parfait sur le plan géométrique et le joint de colle atteindra toujours une épaisseur plus ou moins variable selon la précision des pièces. Il sera donc indispensable que la résine utilisée pour le collage, très thixotrope, soit chargée et armée de fibres de verre coupées, de mat ou de feutre afin de pouvoir épouser toutes les irrégularités. Les fabricants de résine fournissent des produits soigneusement dosés en vue de ces collages.

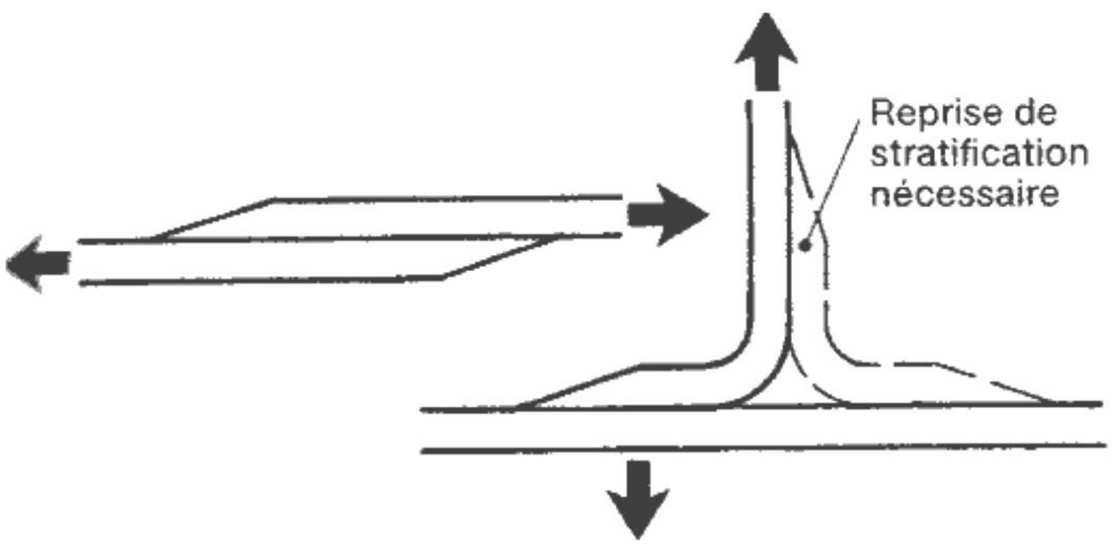


Fig. 5-26 • Un collage travaille toujours mieux dans le sens du plan de collage que perpendiculairement à celui-ci; dans ce cas, pour éviter l'effet de pelage, on doit prévoir une reprise de stratifié.

Ce genre de collage nécessite une pression élevée pour assurer la parfaite répartition de la colle et réduire au minimum l'épaisseur du joint. Celle-ci peut être obtenue par une liaison mécanique complémentaire du collage (liaison pont-coque) ou par des moyens extérieurs (collage des contre moulages). Pour ne pas aboutir à des efforts colossaux, il faudra donc réduire au minimum les surfaces de collage, tout en préservant bien sûr le minimum nécessaire au respect des contraintes mécaniques.

Il faudra penser, par ailleurs, que la direction de l'effort par rapport au plan de collage est importante (FIGURE 5-26) et dans les cas où celle-ci entraînerait des contraintes de pelage (effort perpendiculaire à l'extrémité du joint), une reprise de stratification sera souvent indispensable. On évitera systématiquement les collages « aveugles » qu'il ne sera pas possible de contrôler.

Pour un collage sans reprise de stratification, la largeur du joint sera au moins égale à quinze fois l'épaisseur du stratifié le plus mince (FIGURE 5-27 a). Elle pourra être réduite à dix fois dans le cas contraire (FIGURE 5-27 b).

Les assemblages avec reprises de stratification sont utilisés soit pour la liaison de pièces en stratifié entre elles, parfois comme nous venons de le voir en association avec les collages, soit pour la fixation des cloisons dans les coques.

Dans le premier cas, la reprise devra constituer une prolongation de la pièce à assembler (FIGURE 5-27 c), son épaisseur lui sera donc égale et la largeur de chacune des pièces sera au moins égale à six fois cette épaisseur avec un minimum de 50 mm. A laquelle viendra s'ajouter une partie décroissante au moins égale à trois fois l'épaisseur.

Les bandes de renfort les plus étroites seront placées en premier et recouvertes par les plus larges. On commencera toujours par un mat que l'on alternera ensuite avec du sergé ou du satin, selon les contours à épouser. Pour les cloisons, différents types d'assemblages sont utilisés.

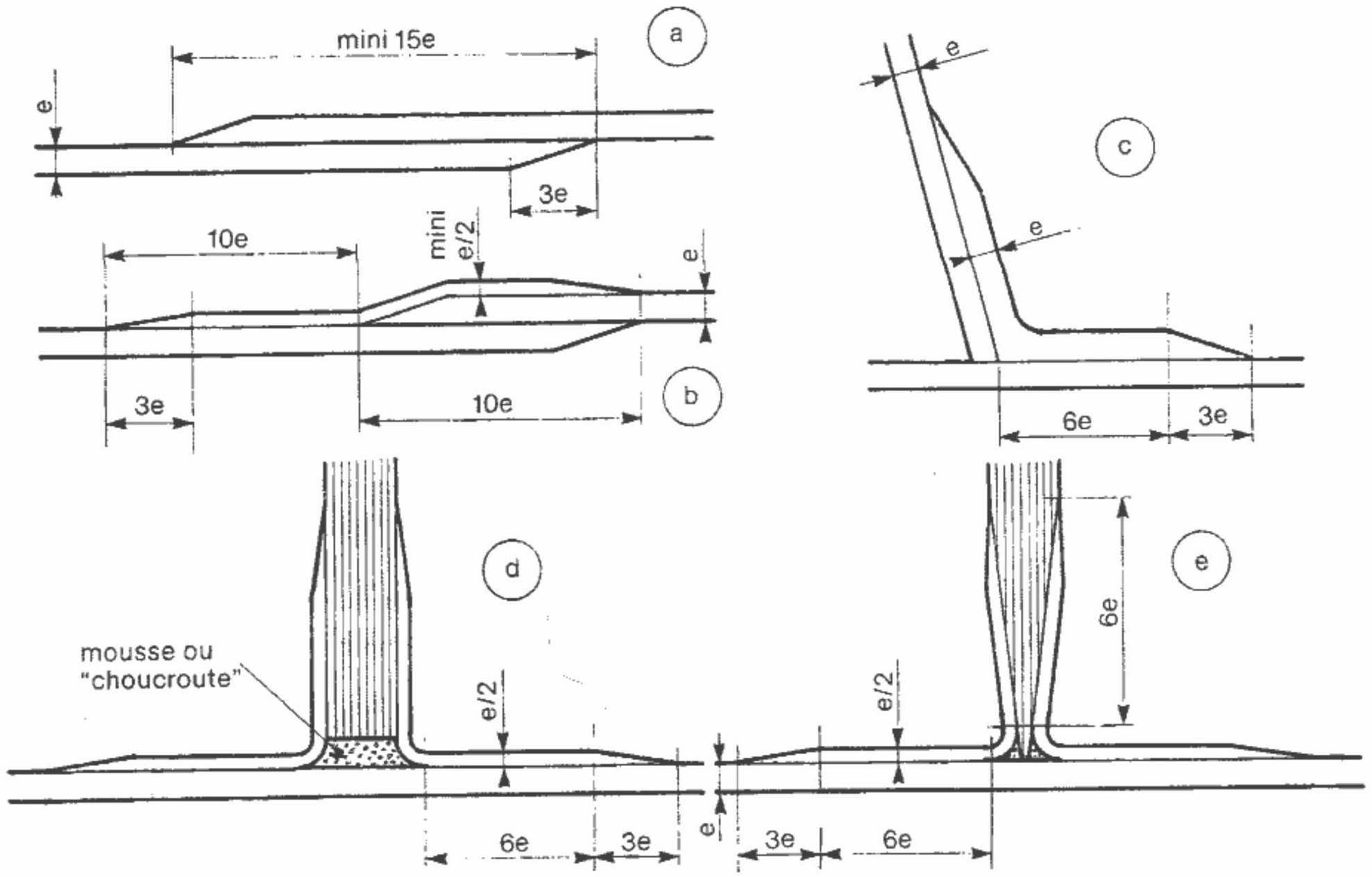


Fig. 5-27 • Proportions des recouvrements et reprises de différents types de collage :
a : à plat sans reprise; b : à plat avec reprise; c : en équerre avec reprise; d : cloison classique; e : cloison chanfreinée.

Dans le premier, le bord de la cloison n'est pas ajusté et repose soit sur une bande de mousse ou tout autre matériau souple, soit sur un lit de colle destiné à boucher l'espace entre la cloison et le bordé pour permettre la stratification des cornières. Le lit de colle a l'avantage de pouvoir être formé à la raclette afin de constituer un congé facilitant la stratification des bandes de renfort (FIGURE **5-27 d**). Dans un second type, la cloison est ajustée et repose sur un simple mat. Ces deux types présentent l'inconvénient, en cas d'effort de flexion, de solliciter au pelage la cornière située du côté opposé à la flexion. C'est pourquoi, surtout si la cloison est épaisse, il sera préférable d'utiliser le troisième type (FIGURE **5-27 e**) dans lequel la cloison est chanfreinée sur toute la largeur de la cornière de façon à réduire son épaisseur à presque rien au contact avec la coque. Si la cloison est pratiquement perpendiculaire au bordé, le chanfrein sera réparti sur les deux faces, sinon il sera taillé du côté de l'angle convexe. Un lit de mat sera placé sur le bordé avant la pose de la cloison et celle-ci pourra être pourvue d'une bande de mat et de tissu à cheval sur les chanfreins avant sa mise en place. Une mèche dans chaque angle permettra de former un léger congé avant la pose des bandes constituant la cornière. Par ce procédé, on élimine l'effet de moment provoqué par l'épaisseur de la cloison en cas de flexion.

Pour ne pas faire supporter au collage sur la cloison des contraintes de cisaillement, il est possible de percer le bord de celle-ci de trous dans lesquels seront enfilées des mèches de roving rabattues sur les parois. Ces trous doivent être parfaitement remplis de résine afin d'interdire aux fibres tout mouvement et leur bord doit être arrondi.

Il ne faudra jamais oublier la préparation nécessaire pour éviter les effets inhibiteurs du phénol de la colle des contreplaqués.

L'épaisseur des cornières sera égale à la moitié de l'épaisseur moyenne du bordé, et la largeur, à six fois l'épaisseur plus le dégradé habituel. Dans le cas d'une cloison en matériau sandwich, si les peaux sont en stratifié, la cornière aura la même épaisseur que celles-ci, mais la largeur de ses ailes sera calculée en fonction de celle du bordé.

Si le sandwich est en bois (balsa ou nid d'abeilles + contreplaqué par exemple), la cloison sera bordée d'un large tasseau en feuillure qui sera chanfreiné selon le type de montage décrit ci-dessus.

Certaines cloisons sont montées sur des contre-moulages. Si elles ne concourent pas à la structure elles peuvent être vissées sur un tasseau collé à l'envers du stratifié, mais ce montage ne peut être admis pour des cloisons structurales.

Le plus important des joints mixtes est celui qui assure la liaison pont-coque, il doit en effet assurer une fonction mécanique non seulement de transmission des contraintes entre les deux pièces mais aussi de raidissement transversal de l'angle du livet et d'élément de renfort longitudinal de la poutre navire. Faut-il ajouter qu'il doit garantir l'étanchéité ? Enfin il est généralement associé à certaines fonctions utilitaires : cale-pied ou pavois, liston, etc. Une foule de solutions ont été adoptées par les constructeurs, plus ou moins complexes, faciles à réaliser et répondant à ces diverses fonctions.

Bien que certains grands constructeurs utilisent encore le montage par emboîtement (FIGURE **5-28 a**), celui-ci est de plus en plus abandonné au profit de montages à plat. Il requiert, en effet, une grande précision des moules et un soin particulier lors de la stratification du rebord du pont pour respecter les épaisseurs. Un bourrage de mat ou de mastic armé est nécessaire au moment du montage. Il est par contre facile d'en assurer la liaison mécanique en combinaison avec un liston en bois ou en profilé de PVC ou de caoutchouc synthétique.

Le montage de la FIGURE **5-28 b** est également à emboîtement mais cette fois par l'intérieur. La stratification du rebord du pont et le bourrage du joint sont plus faciles à réaliser et à contrôler, ce qui permet une tolérance un peu plus grande sur les moules. Il constitue par ailleurs un excellent cale-pied ou pavois selon sa hauteur, l'étanchéité des dalots qui y seront découpés est relativement facile à assurer et une lisse en bois ou un profilé de PVC permettront de cacher la fixation mécanique. Ces deux montages sont démoulables sans ouverture du moule, mais le second doit présenter un angle ouvert vers l'extérieur pour permettre l'emboîtement du pont dans la coque.

Le montage de la FIGURE **5-28 c** est un dérivé du précédent utilisé pour des bateaux plus gros. Cette fois, le joint est à plat, la coque ne pourra donc être démoulée que grâce à un moule ouvrant ou un élément de bordure amovible.

Le plan de collage est réduit, mais son remplissage est garanti et la liaison mécanique se combine parfaitement avec la tenue d'une lisse. Il sera bien sûr préférable de bourrer le vide à l'intérieur de ce pavois avec une latte de mousse et de la résine allégée, afin de constituer une assise stable pour la reprise de stratification intérieure. Le bourrage permettra par ailleurs d'assurer plus facilement l'étanchéité des dalots.

Le plus simple des montages à plat est bien sûr celui de la FIGURE **5-28 d** ou sa variante **e**.

Il ne peut cependant être utilisé que sur de petits voiliers en raison du danger que représente sa protubérance lors des manœuvres d'accostage, tant pour le bateau lui-même, sous des chocs dirigés verticalement, que pour ses voisins. La liaison mécanique est cachée sous un profilé en PVC ou un cale-pied en bois.

Le montage de la FIGURE **5-28 f** qui fut utilisé par Dufour sur les modèles qui ont succédé à l'Arpège permet d'éviter le grave inconvénient du précédent. Il nécessite en revanche un

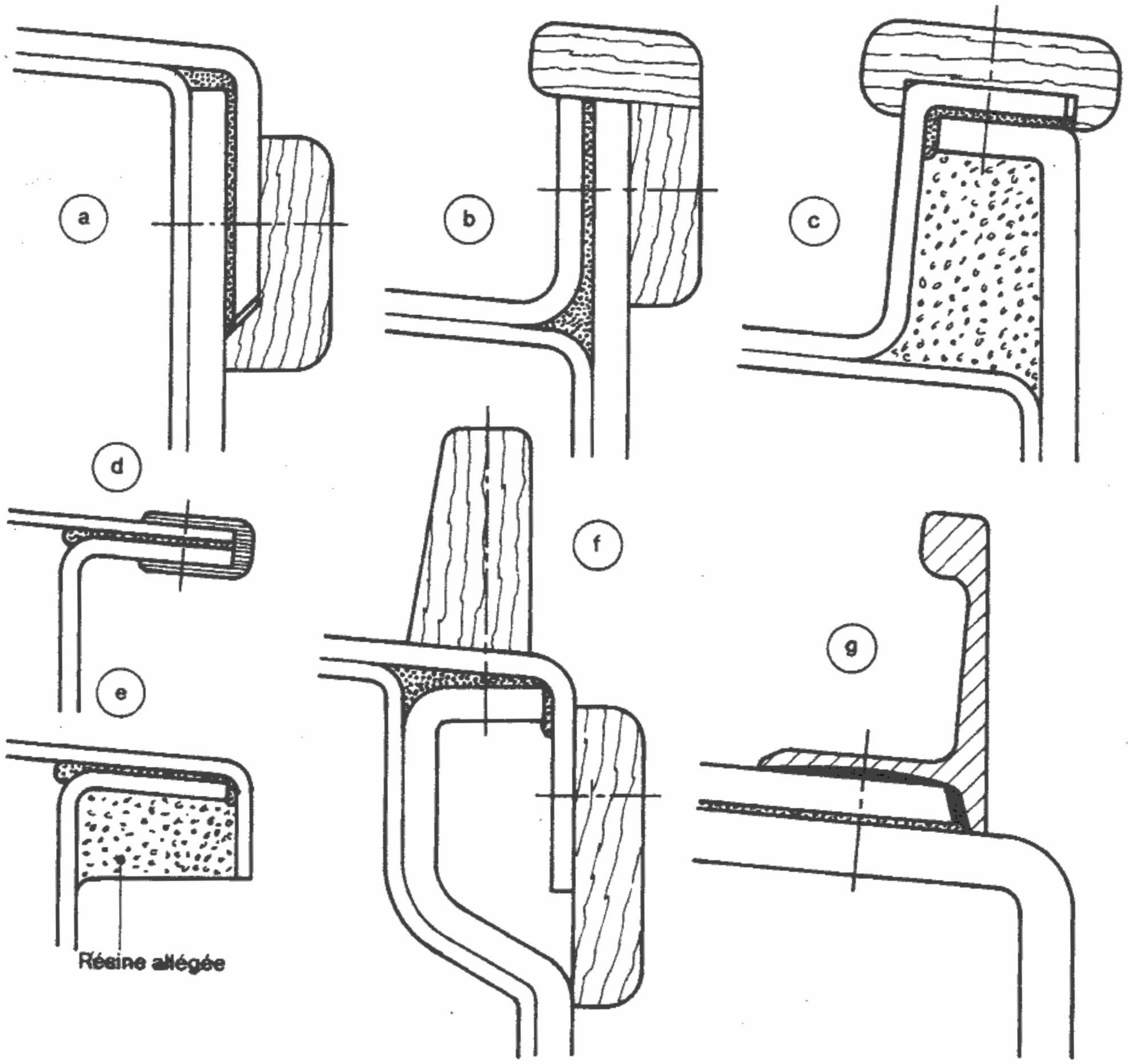


Fig. 5-28 • Différents assemblages pont-coque :
a) emboîtement externe ;
b) emboîtement interne ;
c) à plat sur pavois ;
d-e) à plat pour dériveurs légers ou annexes ;
f) à plat avec lèvres rentrées et préceinte formant cache ;
g) à plat sur bord tombé intérieur et cale-pied métallique.

moule ouvrant. Le creux sous le plat-bord est caché par une large préceinte en bois, vissée sur le rebord du pont, et la liaison mécanique est intégrée à un cale-pied en bois ou en profilé d'alliage léger.

Ces profilés permettent maintenant d'appliquer sans difficulté le montage de la FIGURE **5-28 g**, aujourd'hui le plus couramment employé.

Comme le type **c**, il ne nécessite pas forcément un moule ouvrant car il suffit de rendre amovible la partie servant au moulage du bord tombé.

Le respect de l'épaisseur de celui-ci n'exige pas une grande précision. C'est un peu moins vrai, mais plus facile à obtenir pour le pont. Par ailleurs, la présence de ce rebord confère à la coque sortant de moule une rigidité qui en facili-

te la manutention. Le serrage du joint pendant le collage est parfait en raison de la grande rigidité du profilé, du nombre et de la dimension des boulons. Tout ceci permet d'ailleurs de remplacer la résine polyester chargée, utilisée dans les autres montages, par une colle polyuréthanne plus souple, mouillant mieux les surfaces, donc garantissant une meilleure étanchéité et possédant une forte adhérence, au point qu'il devient possible d'envisager la suppression de la reprise de stratification intérieure. Il faut alors augmenter l'épaisseur du rebord et de la partie adjacente du bordé de façon à leur conserver la même section qu'avec la reprise de stratification, car les autres fonctions mécaniques de celle-ci demeurent. La largeur sera au moins égale à 1/40 du bau maxi et l'épaisseur sera supérieure de 50 % à celle de la zone I. Le dégradé des épaisseurs, en particulier sur le rebord, doit en être d'autant mieux respecté. La préparation des surfaces doit être parfaite et l'utilisation d'un primaire est parfois nécessaire.

Dans ce type de montage, la liaison mécanique participe de façon importante à la transmission des efforts. On ne peut pas en dire autant de beaucoup de montages où celle-ci est assurée par de simples rivets expansibles, type POP, espacés de 10 à 15 cm. La pression est insuffisante pour garantir la bonne répartition de la colle dans le joint et sa résistance au cisaillement inexistante en regard de la surface de collage. Dans ces cas, il est de loin préférable, si la configuration du joint s'y prête, d'utiliser des moyens de serrage extérieurs.

f ▪ Le moulage

A l'exception des constructions à l'unité, la stratification des coques de série s'effectue en moule femelle. Nous en rappellerons brièvement l'élaboration.

La première étape est la réalisation d'un modèle mâle. Celui-ci peut être en bois moulé ou en petites lattes, ou en stratifié sur mannequin comme pour une coque à l'unité. Ce modèle reproduit exactement tous les détails, lèvres de collage, encastrement de lest, antidérapant de pont, etc. de la pièce que l'on désire obtenir. Le modèle est très soigneusement enduit, poncé et peint ou recouvert d'un gelcoat, jusqu'à obtenir un état de finition aussi parfait que possible car celui-ci sera reproduit au cours des étapes suivantes. Il est enfin enduit d'agent de démoulage, cire et alcool polyvinylique.

Selon l'importance de la série envisagée, on tire alors du modèle soit directement un moule unique, soit un moule mère destiné à l'élaboration d'un modèle père sur lequel pourront être pris autant de moules de fabrication que nécessaire.

En effet, les contraintes auxquelles est soumis le modèle original et la dégradation que subit sa surface lors du démoulage ne permettent pas d'en tirer plusieurs moules strictement identiques. Alors que le modèle père, réalisé en stratifié, peut être reproduit à un grand nombre d'exemplaires. De plus, le père peut être à nouveau poncé et poli pour obtenir un aspect de surface impeccable. On peut cependant améliorer la résistance du modèle en bois par un mat léger qui renforcera la tenue des enduits et du gelcoat. Il est alors possible de tirer deux ou trois moules et quelques conformateurs.

Les moules sont réalisés en stratifié avec pour base un gelcoat particulièrement résistant et un stratifié pour lequel on recherche avant tout la rigidité. Celle-ci est renforcée par une armature en bois ou, plus souvent, en métal, dont la configuration permet l'orientation du moule dans des positions facilitant le travail des stratifieurs. Il est enfin pourvu des accessoires nécessaires à sa manutention.

Le choix de la construction du stratifié du moule revêt une importance toute particulière, car il résulte d'un compromis entre la rigidité d'une part, le prix, le poids et la conductibilité thermique d'autre part. Ce dernier point influe sur la vitesse de polymérisation du stratifié et, à une certaine époque, il était courant de charger la résine du moule de poudre d'aluminium afin d'améliorer celle-ci. Pour la même raison, il est toujours délicat d'utiliser une structure sandwich qui possède des qualités d'isolation indésirables et on la réserve à des surfaces peu ou pas galbées et à des moules destinés à des pièces peu épaisses. La durée de vie d'un moule est extrêmement variable selon sa taille, la cadence de production, le soin apporté à son entretien, les contraintes exercées lors du démoulage, etc. On l'estime en moyenne autour de 200 pièces.

Le démoulage est toujours une opération délicate et qui requiert des moyens mécaniques puissants. Il faut, en effet, vaincre non seulement l'adhérence du gelcoat sur le moule, plus ou moins bien réduite par les agents de démoulage, mais surtout la pression atmosphérique qui règne sur les faces extérieures du moule et de la pièce créant entre elles un vide presque parfait. La surface maximum démoulable est donc limitée et l'on utilise parfois l'aide de l'air comprimé ou de l'eau sous pression, injectés en différents points du moule, pour chasser ce vide.

• Adaptation du dessin au moulage

Dans toute la mesure du possible, l'architecte veille à dessiner des pièces qui puissent être réalisées dans un moule d'une seule pièce. Il est toujours possible d'utiliser des moules en deux ou trois parties pour des pièces non démoulables comme une coque frégatée, et cela est même nécessaire dès que l'on atteint une certaine dimension, mais il faut savoir qu'un plan de joint parfait est toujours difficile

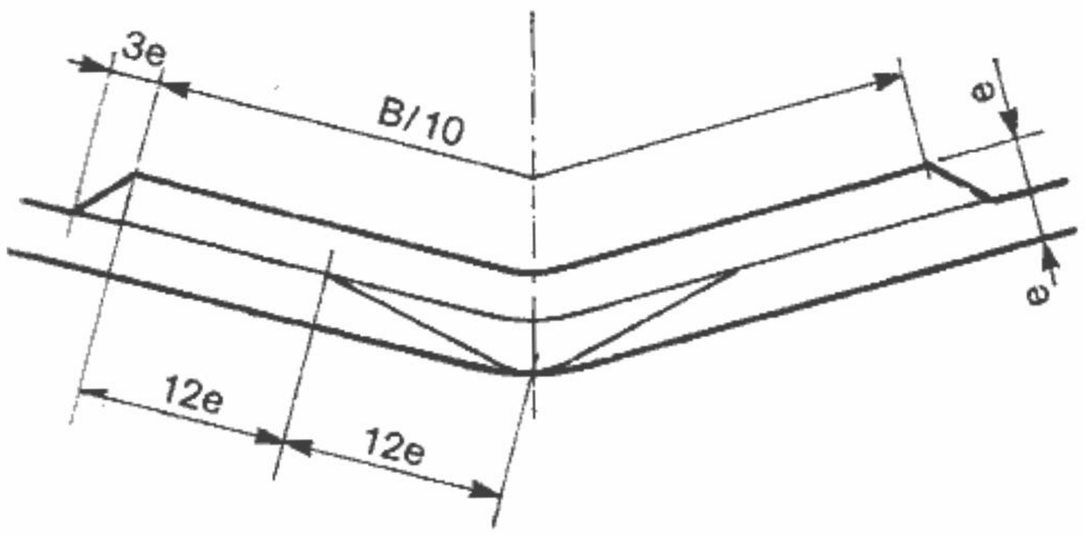


Fig. 5-29 • Renforcement du raccord de deux demi-coques.

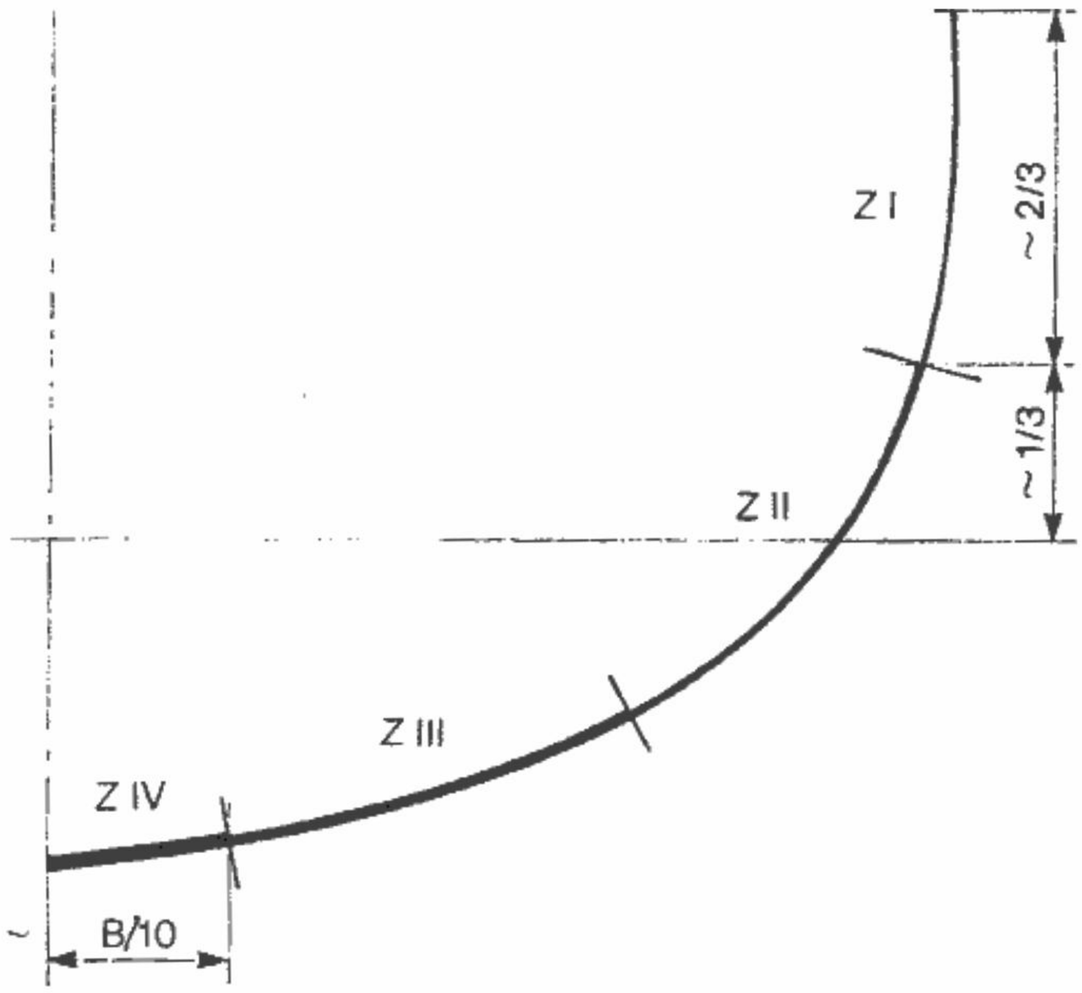


Fig. 5-30 • Définition des limites des zones d'échantillonnage sur une section de coque.

à réaliser, et surtout à maintenir en état tant en ce qui concerne la netteté des arêtes que les déformations du contour.

Il est d'ailleurs souvent possible de résoudre le problème par le choix d'un angle de démoulage correct, c'est le cas en particulier pour les coques, à tableau inversé, si celui-ci fait avec l'étrave un angle ouvert.

On évitera également les formes (en particulier de quilles) qui nécessitent une stratification séparée en deux demi-coques. Le raccordement ultérieur des deux pièces représente toujours une opération délicate, nécessitant des reprises de gelcoat, et un point de faiblesse structurelle. Si, néanmoins, on ne peut éviter une telle construction, on respectera les proportions de recouvrement et de renforts données dans la FIGURE **5-29**.

Le démoulage nécessite par ailleurs de prévoir un angle de dépouille sur toutes les faces des éléments parallélépipédiques, tels que les cockpits par exemple. La pente de ces dépouilles ne doit pas être inférieure à 5 %.

On évitera d'autre part tous les angles vifs concaves ou convexes en raison de la difficulté que présentent les renforts à s'adapter à des pliages brusques, et des risques de bulles qui en résultent.

Lorsqu'il n'est pas possible de les éviter, une projection de fibres coupées par pistolage ou la pose d'une mèche de bourrage sont à prévoir.

Il faut faire attention également aux moulages creux profonds et étroits tels que cale-pied, hiloires de cockpit ou quille. L'ouvrier doit pouvoir, sans trop de difficultés, appliquer le gelcoat au pistolet, mettre en place les renforts et passer le rouleau ébulleur. Lorsque leur volume est peu important, ces reliefs seront comblés par de la mousse ou de la résine allégée.

Les surfaces planes et lisses sont à éviter, car le moindre reflet en révèle toutes les irrégularités.

Comme avec tous les autres matériaux, les ouvertures devront être compensées par des surépaisseurs ou des renforts tels que bords tombés ou nervures, constituant éventuellement un oméga, et leurs angles seront largement arrondis pour éviter toute concentration d'effort.

g • Structure et échantillonnage des coques en plastique armé

Dans la structure des coques classiques, on favorise avant tout le caractère monolithique. Tous les éléments étant intimement solidaires, c'est par leur unité qu'ils assument l'ensemble des contraintes. Ils comprendront donc une enveloppe extérieure autoportante fermée par le pont et les superstructures et rigidifiée par les éléments internes, cloisons transversales ou longitudinales, éventuellement contre-moulages, et par des renforts spécifiques, varangues, lisses, membrures ou porques, la proportion de ces éléments internes et spécifiques dépendant du développement plus ou moins grand des emménagements. Ainsi, un voilier destiné à la croisière, dont les emménagements seront très divisés, aura besoin de moins de renforts qu'un monotype orienté avant tout vers la course côtière.

L'échantillonnage du bordé exploite les possibilités de faire varier l'épaisseur du stratifié. Pour la définition de celles-ci, on considère généralement quatre zones sur la maîtresse section (FIGURE **5-30**) :

- zone I : du livet jusqu'au tiers du franc-bord environ ;
- zone II : bouchain, réparti à peu près également de part et d'autre de la flottaison ;

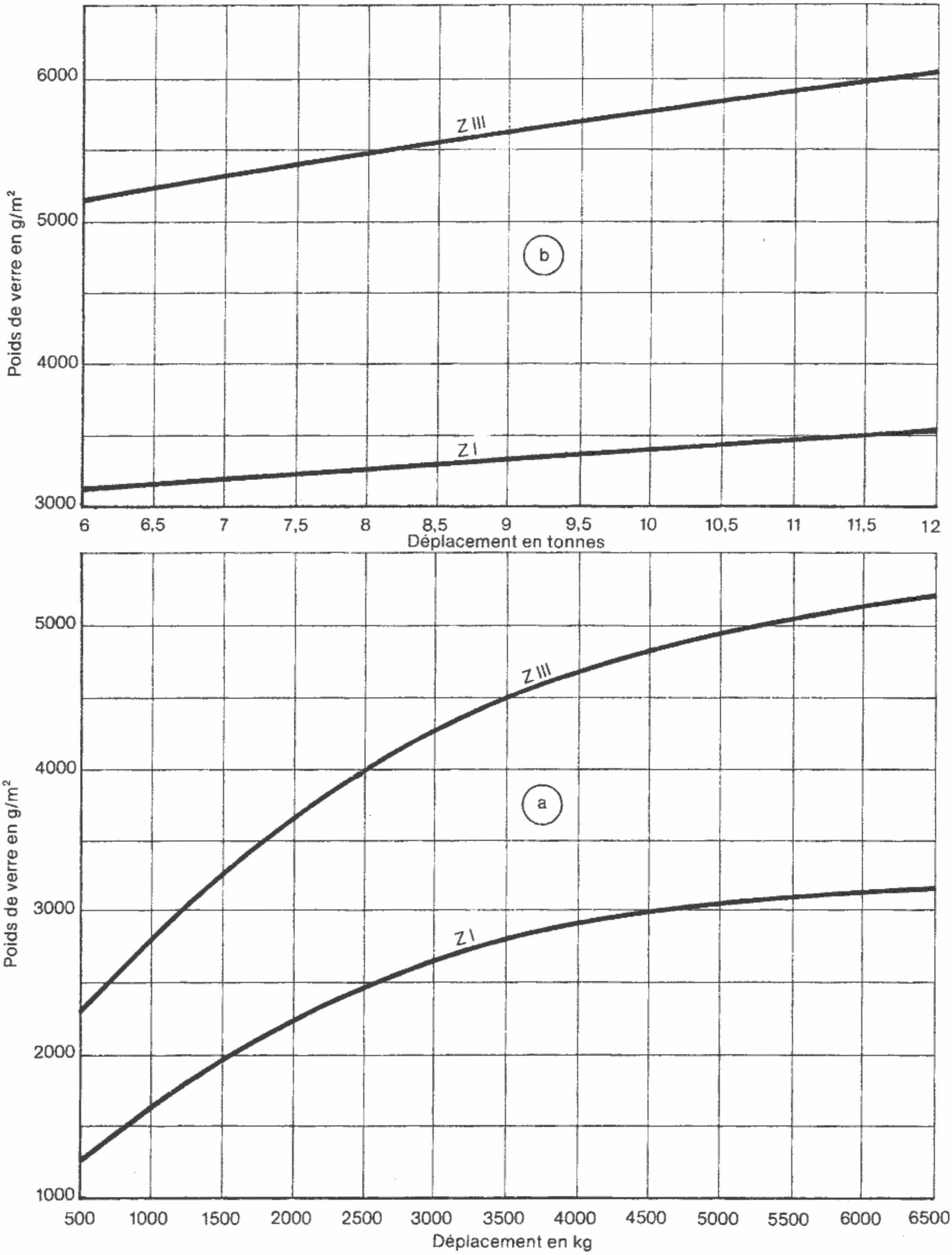


Fig. 5-31 •
a) Poids de verre en renfort du stratifié des zones I et III pour des voiliers jusqu'à 6 tonnes de déplacement.
b) Poids de verre en renfort du stratifié des zones I et III pour des voiliers de 6 à 12 tonnes de déplacement.
Proportion en poids des tissus et du mat ou projeté : 2/1.
Proportion en poids de résine : 3/1 pour le mat, 1,5/1 pour les tissus.

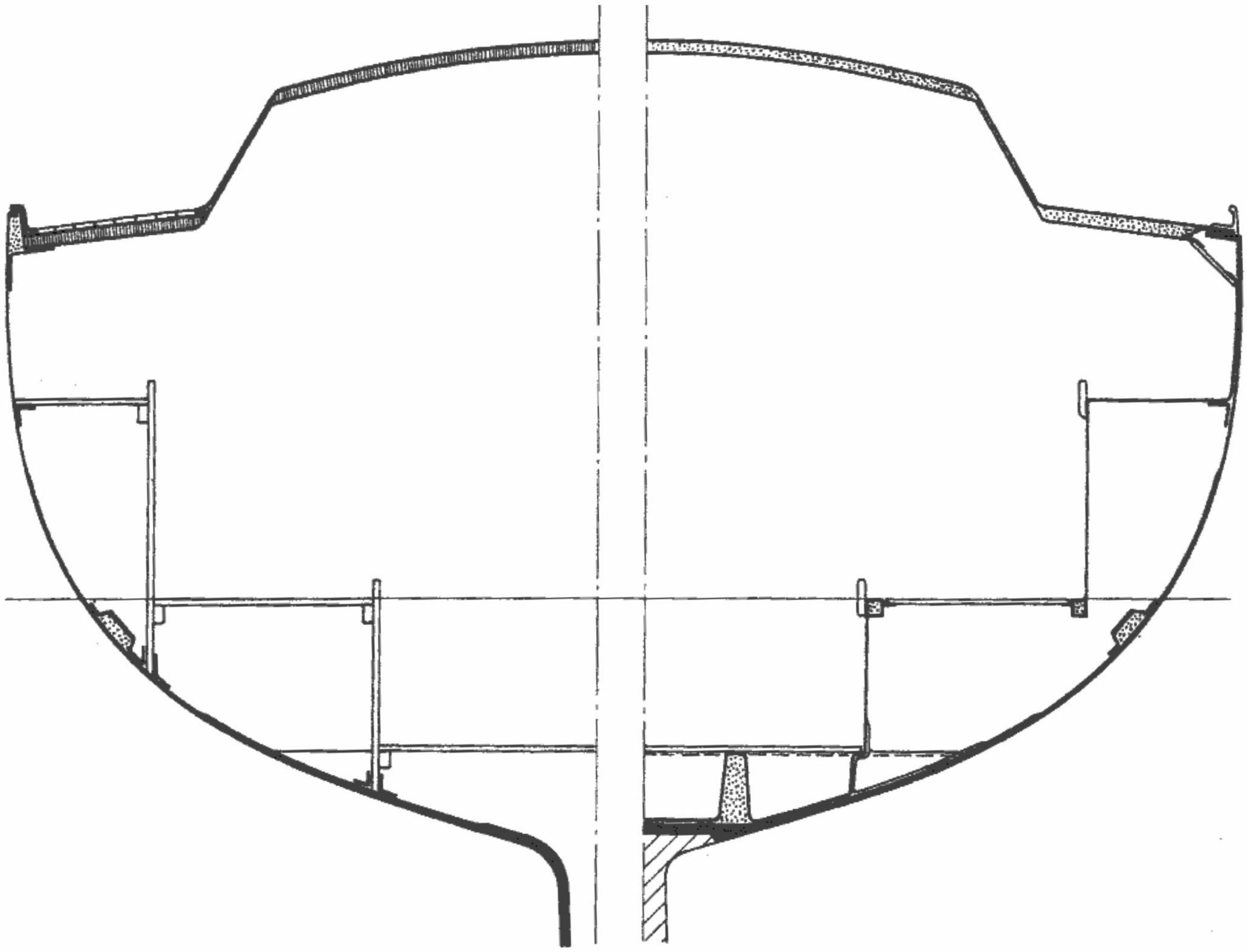


Fig. 5-32 • Deux exemples de construction en stratifié.
À gauche, une construction « personnalisée » dont les emménagements en bois sont réalisés à la demande. Le toit de rouf et le pont sont rigidifiés par un sandwich balsa. À noter, les lattes de teck collées dans un embrèvement des passavants et la liaison pont-coque formant pavois ; celui-ci sera surmonté d'une lisse en teck. Le lest en plomb est suspendu sous un aileron.
À droite, une construction de série avec emménagements moulés. Le toit de rouf et le pont sont rigidifiés par un sandwich de mousse de polyuréthanne dont la peau intérieure est formée par le contre-moulage, l'ensemble étant collé sous vide. La liaison pont-coque est faite à plat avec cale-pied métalliques. La liaison est cachée intérieurement par une latte de bois vissée sur des lèvres des deux contre-moulages. La gaine ainsi formée est utilisée pour le passage des câbles électriques et sert de conduit d'aération. Le lest, un aileron en fonte encastré, est soutenu par un carlingage et par des varangues dont les extrémités des remplissages en mousse sont restratifiées, à l'intérieur des coffres, après le collage du contre-moulage.

- zone III : fonds jusqu'à 1/10 du bau maxi environ ;
- zone IV : zone centrale s'étendant de part et d'autre de l'axe sur 1/10 du bau maxi.

Autour de la semelle de quille ou d'un aileron creux, la zone IV s'étendra de part et d'autre de celle-ci sur une largeur égale au quart de la hauteur totale de l'aileron (lest compris) (FIGURE **5-33**). Parfois une cinquième zone concerne uniquement la quille.

Dans le sens longitudinal, la zone IV constitue un renfort continu du sommet de l'étrave au tableau.

Ces quatre subdivisions ne se trouvent en général que sur des unités de plus de 8 m. En deçà, leur nombre se réduit à trois ou même deux, voire une seule, sur les petits dériveurs légers et les annexes.

Compte tenu de cette variation presque continue des épaisseurs et de la multiplicité des combinaisons de renforts, les échantillonnages ne sont pas donnés par un tableau mais par des graphiques continus.

Ceux-ci (FIGURE **5-31 a et b**) donnent le poids de verre pour les zones I et III, la zone II étant la moyenne des deux et la

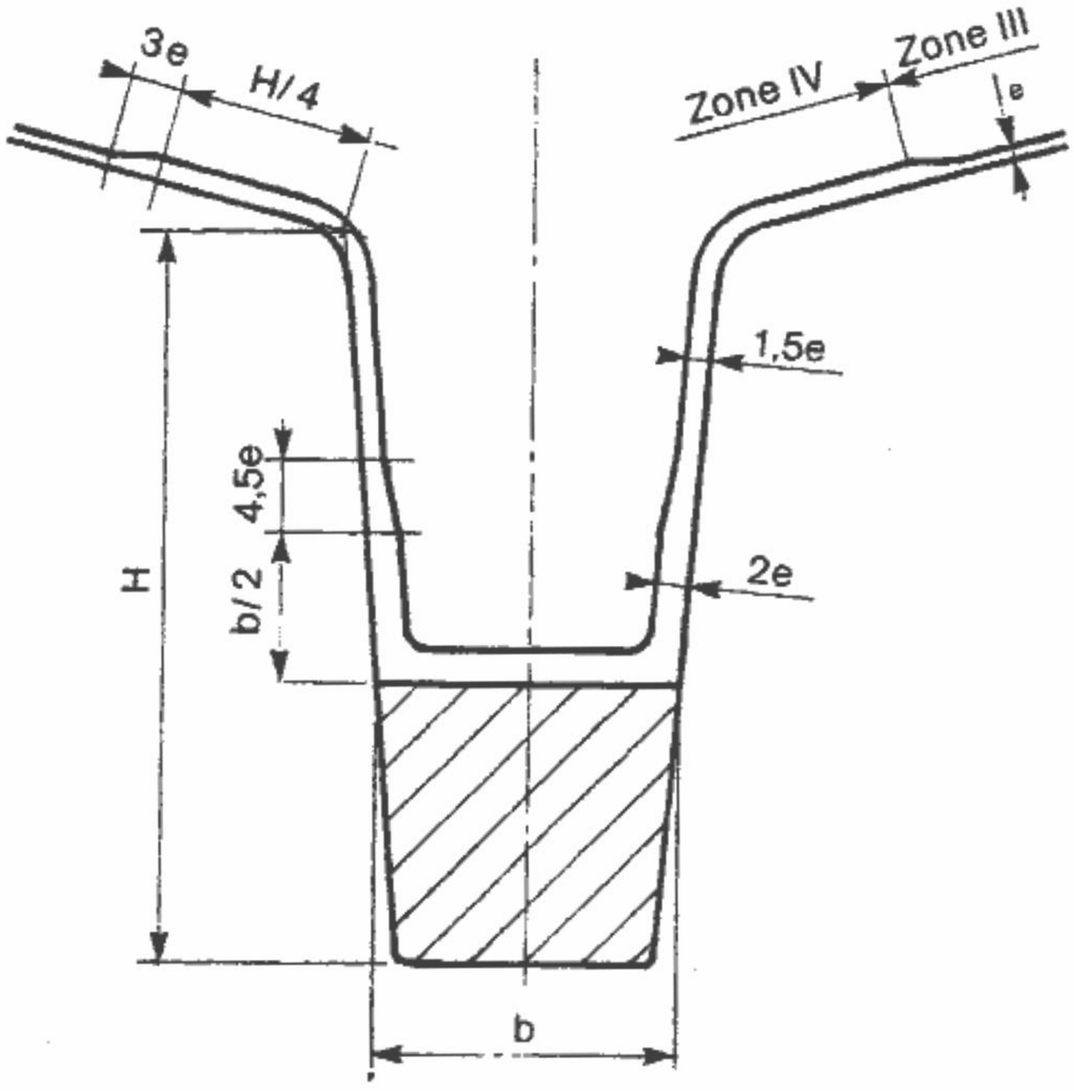


Fig. 5-33 • Renforcement de l'aileron porte lest.

zone IV représentant un accroissement analogue à celui séparant les zones II et III.

Pour une toute première approximation, on peut également considérer qu'en zone II, l'épaisseur du stratifié en mm est égale à la longueur de flottaison en m.

La proportion en poids des tissus par rapport au mat ou au projeté est d'environ 2/1, ce qui avec un rapport résine/verre de 3/1 pour le mat (25 % de verre) et de 1,5/1 pour le tissu (40 % de verre) donne un rapport global de 2/1 soit 33 % de verre dans le stratifié, le gelcoat n'étant compté ni pour le poids de résine ni pour l'épaisseur.

Ces échantillonnages constituent une base correspondant à une bonne fabrication de série. Il est possible bien sûr d'obtenir des rapports verre/résine plus élevés, mais les cas rencontrés au cours de l'étude sont relativement rares, et il faut plutôt considérer que les échantillonnages relevés pour les grands chantiers correspondent à l'application d'un « facteur de sécurité » destiné à offrir une tolérance suffisante dans la qualité de mise en œuvre. Pour un chantier de grande production tenu au respect rigoureux de temps d'opérations, ce facteur de sécurité se situe autour de 1,2.

Il faut noter à ce sujet l'extrême disparité des échantillonnages rencontrée au cours de l'étude qui a porté sur près de 300 modèles différents.

Elle montre que dans ce domaine, nombre d'architectes et de chantiers ne travaillent pas sur de véritables méthodes de calculs, mais avant tout sur l'expérience acquise pour ne pas dire le plus vulgaire « pifomètre » ! Constatation confirmée d'ailleurs par l'étude effectuée par l'Icomia, lors des travaux sur une réglementation de la CEE, où, par rapport à un échantillonnage calculé, les écarts maximums se situaient entre - 78,7 % et + 88 % pour les côtés et - 75 % et + 397 % pour les fonds ! Ceci pour des modèles construits à plusieurs centaines d'exemplaires.

A ces échantillonnages de bordé correspond une structure interne dont le quadrillage ne sera pas supérieur à 1 m² pour la zone I et le tiers arrière de la zone III, à 0,80 m² pour les deux tiers avant de celle-ci, avec un rapport longueur/largeur au plus égal à 2.

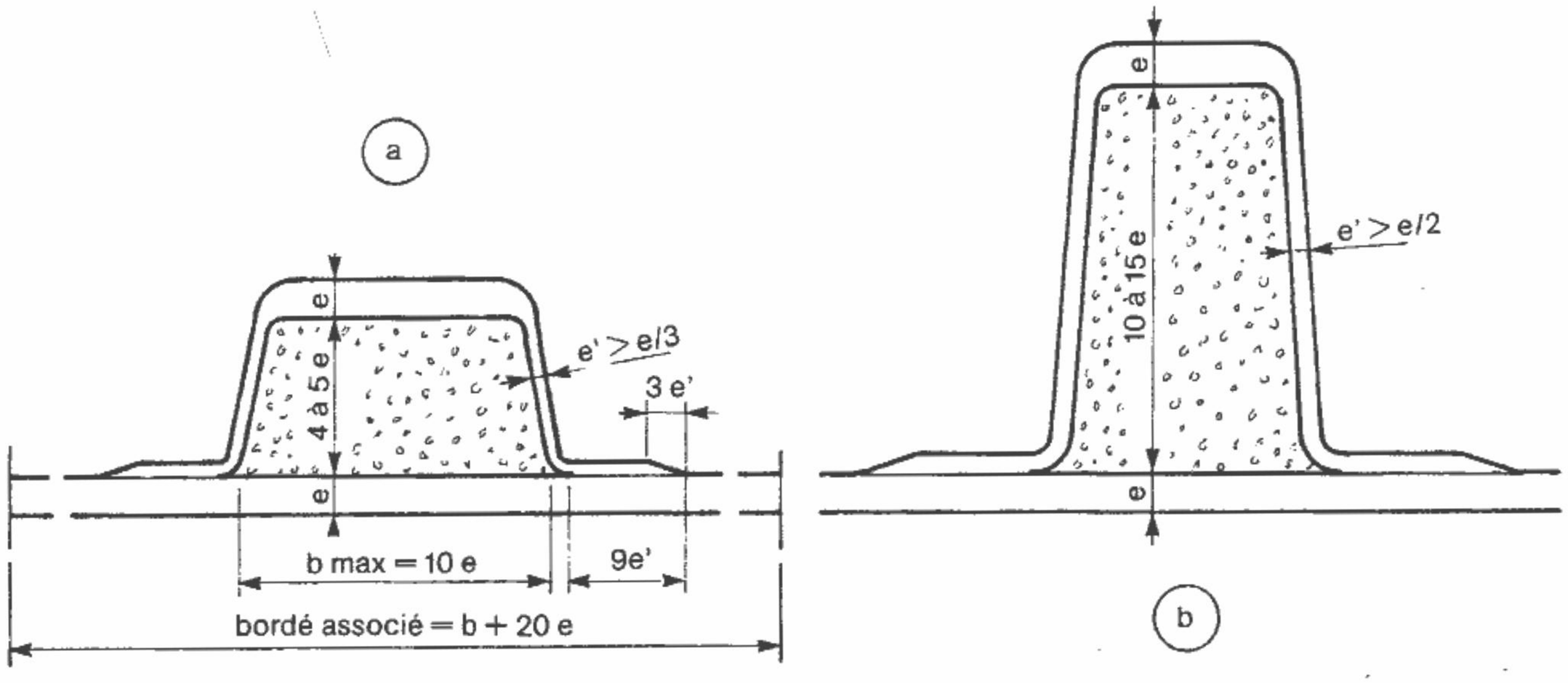


Fig. 5-34 • Proportions des renforts en oméga pour lisses (a) et membrures (b).

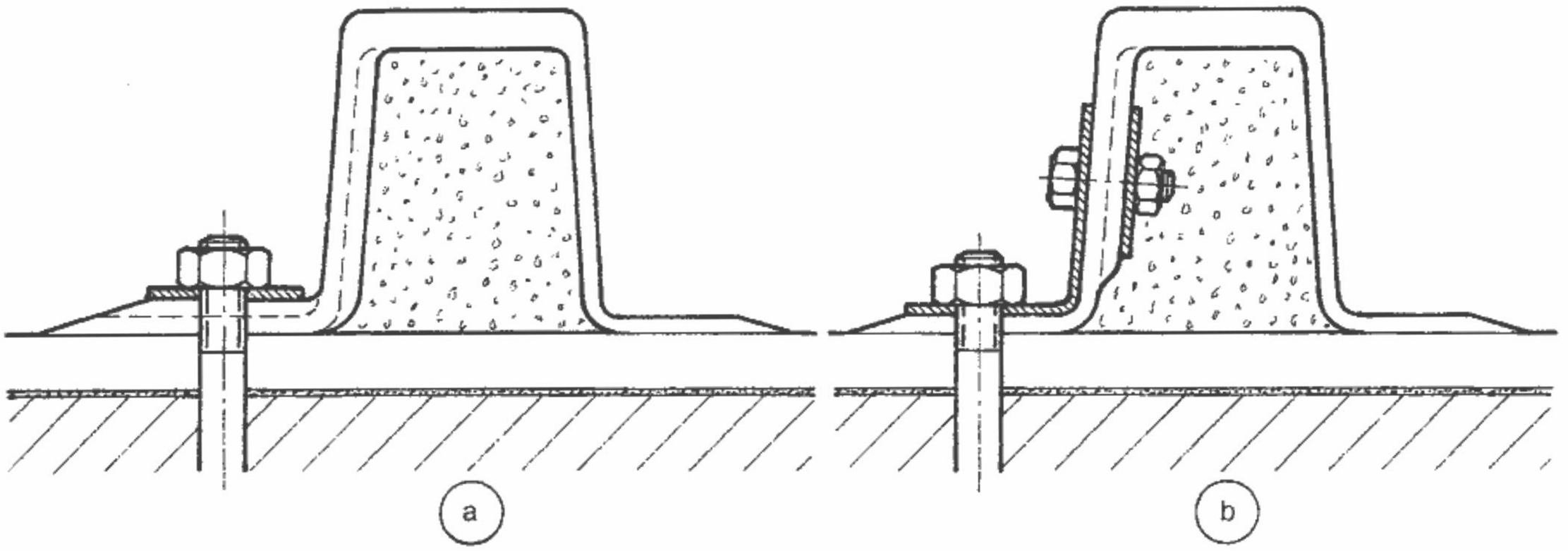


Fig. 5-35 • Renforcement au passage des boulons de quille :
a) par surépaisseur ;
b) par contre-plaques.

C'est ce quadrillage qui déterminera l'adjonction ou non de lisses, de membrures totales ou partielles, et de varangues en dehors de la zone du lest, compte tenu des renforts propres apportés par les emménagements.

La semelle de quille qui portera le lest ou qui sera sollicitée lors des échouages aura une épaisseur supérieure de 50 % et ce renfort s'étendra, dans le cas d'une quille creuse, sur une hauteur égale à la moitié de la largeur de la semelle. Le changement d'épaisseur s'effectuera sur au moins six fois la différence (FIGURE 5-33).

D'autres renforts locaux peuvent être nécessaires sur certains angles vifs, au tableau ou sur des bouchains par exemple. L'épaisseur de ces renforts sera égale à 50 % de celle du bordé à cet endroit, leur largeur sera égale à 1/40 du bau maxi et le changement d'épaisseur s'effectuera sur au moins six fois la différence.

Comme pour les autres matériaux, ces échantillonnages constituent une base autour de laquelle il est possible de jouer par exemple en faisant varier le rapport entre l'épaisseur du bordé et le quadrillage des renforts.

Lisses : afin de réduire le moins possible le volume intérieur utile, les oméga constituant les lisses ont généralement un rapport hauteur/largeur inférieur à 1. On prendra alors pour le sommet une épaisseur égale à celle du bordé, et pour la hauteur de l'âme, environ quatre fois celle-ci. La largeur du sommet dépendra du module d'inertie à obtenir avec une largeur de bordé associé égale à vingt fois l'épaisseur de celui-ci plus la largeur à la base de l'âme du renfort (FIGURE **5-34 a**).

L'épaisseur des flancs sera égale au tiers de celle du sommet pour une résistance à la compression minimum de l'âme de 0,08 daN/mm².

Membrures : leur encombrement en épaisseur étant moins gênant que pour les lisses, leur hauteur peut être le double de celles-ci, mais l'épaisseur des flancs sera alors égale à la moitié de celle du sommet. La largeur se trouvera ainsi considérablement réduite. Si l'une des faces est destinée à recevoir des éléments d'emménagements non structuraux, elle n'aura pas de pente et sera munie, à l'intérieur, de renforts en contreplaqué dans lesquels ils seront vissés (FIGURE **5-34 b**).

Varangues pour ailerons rapportés : à une certaine époque il était de mode de supprimer les varangues, tout au moins dans les voiliers dont le déplacement n'était pas supérieur à 2 tonnes environ, et à les remplacer par un fond épais. A cette époque, le pétrole était moins cher et de ce fait le rapport prix matière/prix main-d'œuvre plus favorable à la première. Personnellement, je n'ai jamais été partisan de cette solution qui implique des contraintes très localisées et alternées que supportent très mal le stratifié.

Depuis, les avantages économiques ayant disparu et la « simplification » ayant révélé ses vices, on est revenu aux solutions classiques. On adoptera les mêmes dimensions et le même nombre que pour la construction en bois moulé (TABLEAU **5-II - PAGE 15**) en effectuant la transformation bois/stratifié selon les formules décrites dans la partie précédente pour le calcul des varangues, en conservant le même facteur de sécurité.

On respectera toujours les conditions concernant l'aboutissement sur un élément de structure longitudinal. Celui-ci sera souvent constitué par les nervures recevant le pied des cloisons longitudinales supportant les couchettes ou d'autres éléments d'emménagement.

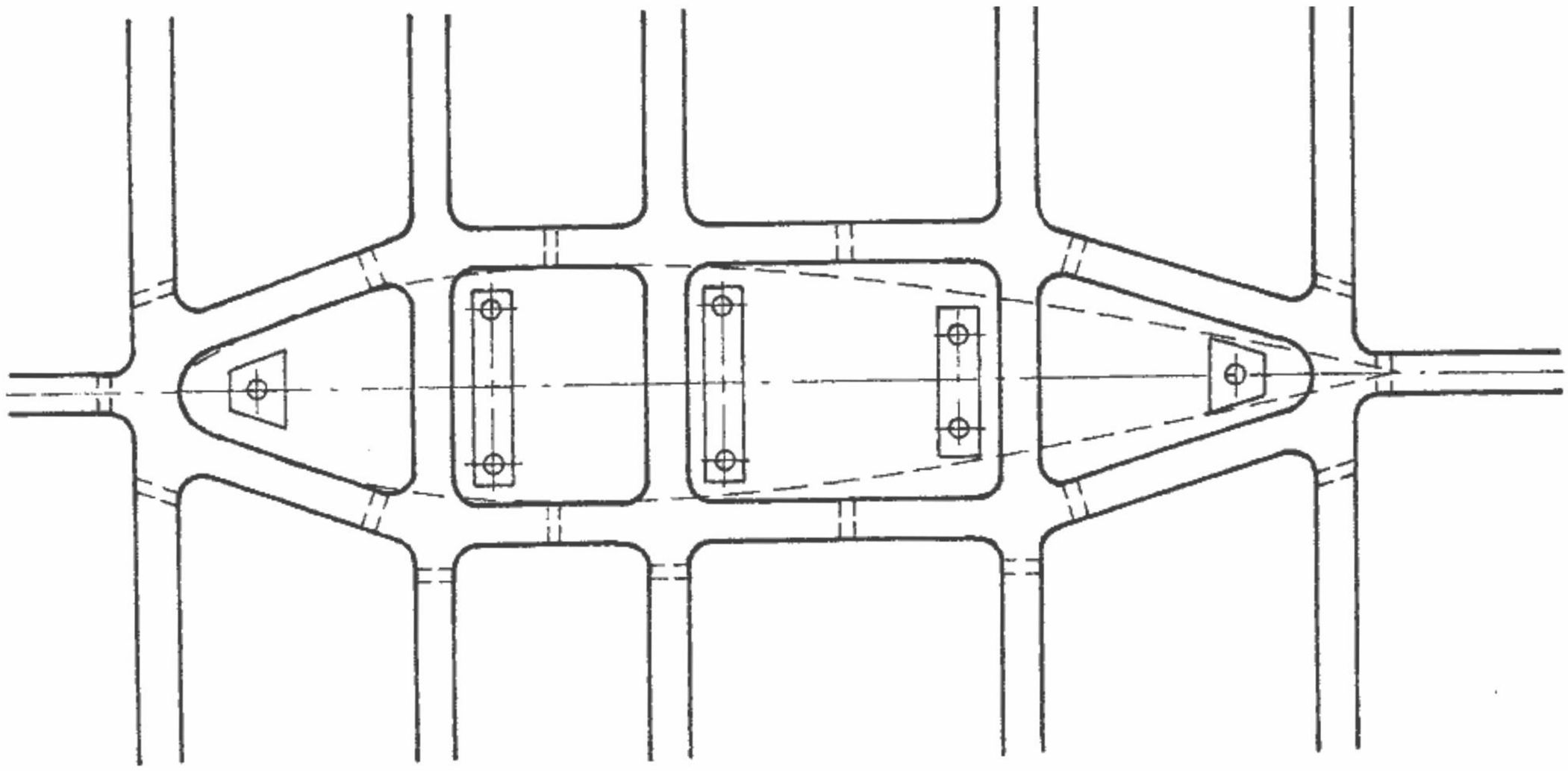


Fig. 5-36 • Disposition de varangues et carlingues avec anguillers pour fixation d'un aileron extérieur.

L'âme de ces varangues peut être en mousse ou en contreplaqué si elles sont moulées *in situ*. Cependant, il s'agit plus souvent de contre-moulages et il ne sera alors nécessaire de prévoir des remplissages qu'aux endroits où des fixations sont prévues, mais alors l'épaisseur des flancs sera égale à celle du sommet. Celle-ci sera basée sur l'épaisseur de la zone III.

Comme il est toujours difficile d'être sûr de l'étanchéité interne d'un élément sandwich comme des varangues, lorsqu'il est percé d'un trou communiquant avec l'extérieur et que sa résistance en compression est souvent faible, les boulons de quille ne traversent pas les varangues dans une construction en stratifié. Ils sont donc placés entre elles mais le plus près possible. Cette solution, bonne sur le plan de la résistance à la compression et de l'étanchéité, présente en revanche l'inconvénient de faire reposer la transmission de l'effort de flexion du fond à la varangue sur le collage de celle-ci.

Il est donc indispensable de respecter quelques impératifs (FIGURE 5-35).

Le premier sera de toujours placer les boulons sur la lèvre de collage. Celle-ci travaille alors au cisaillement sans influence sur le collage.

Une contreplaque réunissant les boulons, lorsque ceux-ci vont par paire, assurera une répartition aussi large que possible de l'effort et des renforts de tissus localisés le transmettront à la varangue.

A partir d'une dizaine de tonnes, la contreplaque, en équerre, pourra assurer cette fonction. Sur les plus grosses unités, on en arrive même à prévoir une structure métallique complète englobant le support de pied de mât et constituant une carlingue. Celle-ci est d'autant plus nécessaire que, compte tenu du module d'élasticité relativement bas des stratifiés classiques, les flèches sous l'effort sont importantes. On s'en rend bien compte lorsqu'une coque est soulevée sous une grue. Il n'est pas rare alors qu'un jour de plusieurs millimètres apparaisse aux extrémités du lest. On le constate également dans des différences de creux dans les fonds et de tirant d'eau importantes (parfois plusieurs centimètres) lors de la jauge de certains voiliers de course IOR. Faute de pouvoir aisément placer une carlingue sur le sommet des varangues, comme dans une construction en bois, on prévoira, soit une nervure centrale si l'écartement des boulons le permet, soit deux nervures parallèles aussi proches que possible. Se pose alors le problème de l'assèchement des fonds. Il est en fait peu important, car ces nervures limitent le déplacement latéral des eaux, qui est le plus gênant, et il est toujours possible de ménager des anguillers en incluant dans les angles et sur l'axe des demi-tubes de PVC (FIGURE 5-36).

Varangues des quilles creuses : leur rôle mécanique est plus réduit que dans le cas précédent car les parois de la quille répartissent une part importante de l'effort sur toute la longueur. Elles sont néanmoins nécessaires pour assurer l'in-

déformabilité transversale. Elles seront réalisées en contreplaqué stratifié à l'intérieur de la coque comme une cloison. Leur épaisseur sera celle de la cloison de mât, leur nombre, leur espacement et leur hauteur sur râblure, ceux prévus pour les coques en bois moulé (TABLEAU 5-II - PAGE 15). Le sommet sera doublé sur une hauteur égale à trois fois l'épaisseur. Elles peuvent aussi être réalisées en stratifié avec un bord tombé, mais cela offre peu d'intérêt.

On évitera la solution du lest intérieur car le stratifié résiste très mal à l'abrasion lors des échouages avec tous les risques d'infiltration d'eau que cela comporte.

Pour le lest extérieur, les renforts reliant les boulons de quille aux varangues, dont nous avons parlé pour le cas précédent, ne seront nécessaires que pour les unités de plus de 15 t environ ou si le lest représente plus de 75 % de la hauteur totale de la quille. En revanche, une carlingue supérieure sera toujours bienvenue.

Cloisons : qu'il s'agisse de celle de mât ou des cloisons intermédiaires, on se référera à nouveau au TABLEAU 5-II. Les porques ou les membrures prolongeant les cloisons partielles seront calculées par équivalence.

Sur les grandes unités, lorsqu'une structure métallique est prévue pour la tenue du pied de mât et du lest, une bonne solution consiste à y inclure un élément transversal au niveau des haubans sur lequel pourront être repris des tirants provenant des cadènes.

La longueur de ces tirants sera bien sûr réglable pour permettre un ajustement après assemblage du pont sur la coque. Un moyen simple de réaliser ces tirants consiste à les construire en deux éléments de barre ronde munis d'une chape ou d'un œil à une extrémité et d'un filetage de pas inversé à l'autre, et réunis par une cage de ridoir.

Ce type de structure transversale plus ou moins simplifiée est d'ailleurs applicable à toutes les tailles de voiliers. De même les tirants, lorsque les cadènes ne sont pas dans le plan d'une cloison, remplaceront avantageusement les goussets en reportant l'effort sur des éléments de structure interne transversaux, ou plus souvent longitudinaux, cachés dans les emménagements et qui, de ce fait, peuvent être largement dimensionnés.

Attention cependant à leur interférence avec lesdits emménagements, évitez par exemple de les faire passer au milieu d'une couchette, cela s'est vu !

Lorsqu'il n'y a pas de cloison au niveau du mât, on veillera particulièrement à la rigidité de la structure constituée par la porque, l'épontille et les tirants des cadènes.

Pont : l'échantillonnage de base du pont sera celui de la zone I mais le barrotage sera généralement remplacé par un sandwich avec une âme de balsa bois debout. Il possédera le même module d'inertie que le stratifié monolithique.

Dans le sens longitudinal, la largeur des panneaux entre appuis ne sera pas supérieure à un mètre, sinon des barrots de module d'inertie équivalent à ceux en bois seront ajoutés.

Néanmoins, si la structure sandwich permet de donner au pont une raideur et une résistance à la pression extérieure suffisantes, elle réduit la résistance à la compression axiale et les coques en plastique ont souvent le défaut de fléchir plus que les autres sous les efforts du gréement longitudinal. C'est pourquoi il ne serait pas inutile de prévoir des lisses de renfort longitudinales passant par exemple dans l'angle des hiloires de rouf et de cockpit.

Les dimensions extérieures de leur section n'ont pas besoin d'être très grandes puisqu'elles ne travailleront pas en flexion, mais le poids de verre contenu doit être élevé. A l'avant, elles peuvent se réunir en un seul renfort axial jusqu'à l'étrave, et se prolonger à l'arrière jusqu'aux fixations du pataras.

Rouf : l'échantillonnage du toit de rouf sera identique à celui du pont. Les hiloires, en revanche, seront en stratifié monolithique et renforcées pour tenir compte des ouvertures de hublots. Si celles-ci ne laissent que des montants étroits, ceux-ci seront renforcés par des oméga verticaux.

Par sa très grande flexibilité dans le dessin des formes, la construction en stratifié permet toutes les fantaisies, il est bon cependant de ne pas trop en abuser car une trop grande complexité augmente toujours les coûts et les difficultés de fabrication.

D'autre part, il ne faut pas oublier son faible module d'élasticité qui entraîne des problèmes de rigidité lorsque l'on désire réaliser des coques de grandes dimensions (au-delà d'une quinzaine de mètres) sans avoir recours à des matériaux ou des techniques de construction particulières ou sans un alourdissement important.

Si, pour le bordé, la construction en sandwich permet de résoudre ce problème au niveau des contraintes de pression, la tenue en flexion de la poutre navire nécessite une structure interne, éventuellement métallique, particulièrement bien étudiée. Il n'est pas possible de donner une règle générale car, s'agissant presque toujours de voiliers construits à l'unité, chacun est un cas particulier qui nécessitera une étude attentive.

2 MATÉRIAUX ET TECHNIQUES À HAUTES PERFORMANCES

Les thèmes sur lesquels portent les recherches vers des matériaux et des techniques à hautes performances touchent les trois composantes de la construction en stratifié : les résines, les renforts, leur mise en œuvre.

La plupart de ces produits et de ces techniques sont issus de la recherche aéronautique et spatiale ou militaire. C'est

dire que souvent leur prix de revient n'a pas été un facteur déterminant lors de leur élaboration. Néanmoins, en fonction des débouchés qu'ils peuvent trouver dans d'autres secteurs, ces prix peuvent évoluer considérablement, l'aspect économique de leur utilisation est donc continuellement remis en question. L'image que l'on pourrait en donner à l'instant où ces lignes sont écrites n'aurait donc plus aucune signification à plus ou moins long terme, c'est pourquoi je n'insisterai ici que sur les avantages techniques qu'ils peuvent procurer.

a ▪ Les résines

Nous avons vu au chapitre précédent que les caractéristiques globales d'un stratifié dépendaient de l'équilibre de celles de ses composants, la matrice et le renfort. Que l'un des deux atteigne sa limite de rupture avant l'autre, et c'est l'ensemble qui s'effondre.

Or, malheureusement, l'ensemble résine polyester et fibre de verre est dans ce cas. La résine atteint sa limite de rupture avec un allongement de 2,4 % environ alors que la fibre de verre E atteint près du double. Le stratifié ne peut donc donner ses caractéristiques optimums si l'on n'utilise pas une autre résine mieux adaptée.

Celles-ci existent, il en existe même deux, les vinylesters et les époxydes qui toutes deux atteignent un allongement à la rupture qui peut aller jusqu'à 5,5 %, donc supérieur à celui du verre E.

Les courbes de la FIGURE 5-37 montrent à quel point peut ainsi être améliorée la résistance à la rupture d'un stratifié. D'autant plus que ces résines elles-mêmes ont une résistance à la rupture et un module d'élasticité plus élevés. Il faut ajouter encore qu'elles ont une bien meilleure tenue à l'eau.

A titre tout à fait indicatif, le prix de la résine époxyde est à peu près le double de celui du polyester isophtalique, le vinylester se situant à mi-chemin.

Attention, l'emploi de ces résines nécessite un « finish » des fibres de verre différent et la mise en œuvre, tout au moins pour les époxydes, est plus longue — viscosité plus élevée et polymérisation plus lente.

Un inconvénient de ces résines est que, pour atteindre leurs caractéristiques optima, il est nécessaire de leur faire subir une « postcure » à température (entre 50 et 100°C).

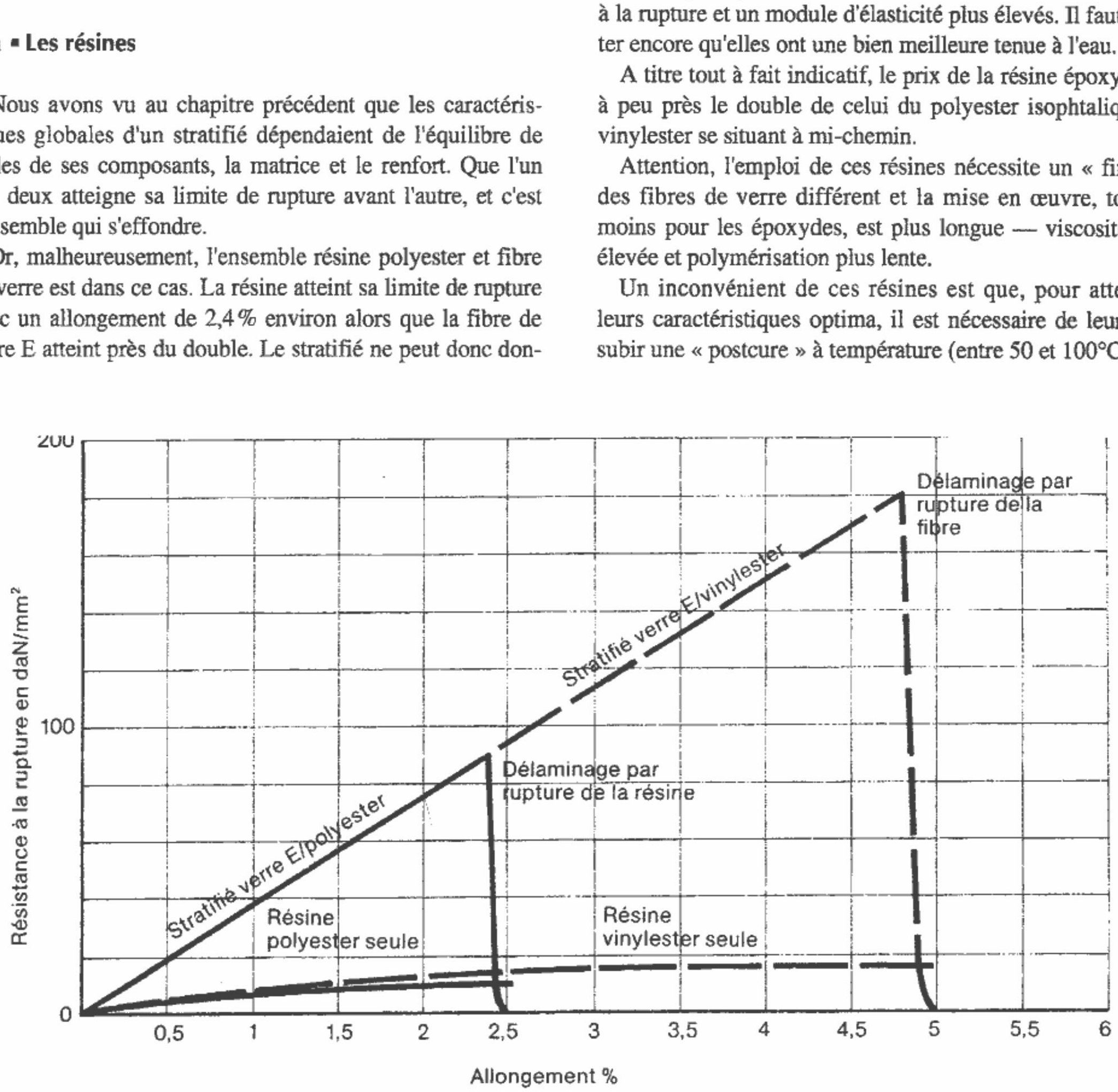


Fig. 5-37 • Comparaison des résistances de stratifiés à base de verre E et de résine polyester ou vinylester. La résine polyester qui se rompt à un allongement de 2,4 % ne permet pas au verre de donner toutes ses possibilités. Ceci ne peut être obtenu qu'avec une résine vinylester dont l'allongement à la rupture est supérieure à celui de la fibre. (*D'après doc. Orcon Corp.*).

TABLEAU 5/IX
COMPARAISON DE RÉSINES POLYESTER, VINYLESTER, ÉPOXYDE

	R_t daN/mm²	A %	E daN/mm²	d
Polyester	7	2,4 %	246	1,2
Vinylester	8,4	5,5 %	358	1,12
Epoxyde	jusqu'à 14	jusqu'à 5,5	562	1,18 à 1,24

b ▪ Les renforts

Trois types de renforts principaux sont actuellement couramment utilisés dans les stratifiés à hautes performances : le verre R (ou S dans les pays anglo-saxons), les fibres polyamides aromatiques, ou aramides, les fibres de polyéthylène et la fibre de carbone.

Le verre R développé en France par Vétrotex Saint-Gobain pour l'industrie aérospatiale, possède une composition chimique différente du verre E qui lui confère en particulier une meilleure résistance à l'humidité.

D'autre part, le filament étant moitié plus fin, la surface d'accrochage avec la résine est doublée ce qui améliore considérablement les caractéristiques du stratifié et lui donne surtout une meilleure tenue à la fatigue.

Afin de réduire le moins possible les caractéristiques de la fibre vierge, les renforts à base de verre R ne sont fabriqués que dans des constructions faisant intervenir le moins de manipulations possibles, satins et unidirectionnels.

Les fibres aramides développées par Du Pont de Nemours en 1965 pour les industries aérospatiales sous la marque Kevlar ou Twaron aux Pays-Bas ont connu une application importante dans la fabrication des pneumatiques à carcasse radiale.

Deux nuances sont utilisées en construction de plaisance, le Kelvar 29 pour les cordages et le Kevlar 49 pour les renforts de stratifiés. Ce dernier est particulièrement intéressant pour ses rapports résistance/poids et module d'élasticité/poids. Ce dernier étant obtenu grâce à un allongement très faible.

Il permettrait d'envisager son utilisation avec le polyester, cependant on préfère l'employer avec des résines vinylester ou époxydes pour s'assurer que ses performances seront utilisées de façon optimum.

Les fibres aramides offrent également une très bonne résistance à l'impact, ce qui les fait utiliser dans la fabrication des gilets pare-balles, mais leur résistance en compression est beaucoup moins bonne et elles présentent quelques difficultés d'imprégnation, en particulier à cause de leur faible densité, qui nécessite une technique différente du stratifié classique verre-polyester.

On les trouve dans des tissages taffetas, sergé, satin et en unidirectionnel, et des grammages de 60 à 450 g/m², mais plus souvent dans des tissus hybrides, en association avec le verre ou le carbone.

Les fibres de polyéthylène offrent également des caractéristiques très intéressantes. Fabriquées en Hollande par DSM, sous la marque *Dyneema*, ou *Spectra* au Japon et aux U.S.A., leur densité est de 0.97 pour une résistance à la traction de 280 à 300 daN/mm², analogue aux aramides mais un allongement à la rupture de 3,5 à 3,6 %, supérieur de 50 %, et un module d'élasticité de 9 000 à 9 500 daN/mm².

Elles sont donc particulièrement performantes aux

TABLEAU 5/X
CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES VIERGES

	R_t daN/mm²	R_c daN/mm²	A %	E daN/mm²	d	R_t/d	E/d	R_t/d^2	E/d^3
Verre E	350	175	4,8	7 380	2,54	138	2 905	54,2	450
Verre S	465	232	5,4	8 860	2,49	187	3 560	75	574
Kevlar 49	280	90	2,4	13 360	1,44	194 (62,5)	9 280	135	4 404
Carbone HR	330	240	1,4	23 200	1,74	190	13 330	109	4 404
Dyneema SK60	270	-	3,5	8 900	0,97	278	9 175	286	9 752

Note : Pour le Kevlar, le chiffre entre parenthèses est le rapport $\mathbf{R_c/d}$, dont on voit qu'il est plus faible que pour toutes les autres fibres. Les résistances en compression ont été estimées à 50 % de R_t pour le verre, à 32 % pour le Kevlar et à 72 % pour le carbone. (*D'après document Orcon et DSM*)

TABLEAU 5/XI

CARACTÉRISTIQUES D'ÉPROUVETTES DE STRATIFIÉ FIBRE/ÉPOXYDE CONTENANT 50% EN VOLUME DE FIBRES UNIDIRECTIONNELLE

	FIBRES			
	Verre E	Verre R	Aramide H.R.	Carbone H.R.
Traction				
R_t daN/mm²	23	34	32	32
E_t daN/mm²	730	870	1250	2410
A%	3,5	3,3	2,4	1,3
Compression :				
R_c daN/mm²	9,6	11,1	1,91	9,3
Flexion longitudinale :				
R_f daN/mm²	11	13,1	5,8	12,4
E_f daN/mm²	303	404	426	950
Flexion transversale :				
R_f daN/mm²	0,7	1,06	0,32	0,93
E_f daN/mm²	94,5	118	43	70
Cisaillement interlaminaire :				
G daN/mm²	9,6	11,1	1,9	9,3
Résilience (J/cm³)	9,8	10,6	9,1	2,2
Densité	1,87	1,85	1,32	1,47
R_t/d	12,3	18,4	24,2	21,8
R_c/d	5,13	6	1,45	6,33
R_f/d^2	3,15	3,83	3,33	5,74
E_f/d^3	46,3	63,8	185,2	299

(D'après document Vétrotex)

contraintes d'impact. Mais, comme pour les aramides, leur faible densité provoque des difficultés d'imprégnation et elles seront généralement utilisées dans des tissus hybrides que l'on placera de préférence en face intérieure du stratifié.

D'autres fibres à hautes performances, les polymères à cristaux liquides Vectra de Hoechst Celanese. Les multifilaments Vectran obtenus sont de type HS (haute ténacité), utilisés essentiellement pour la fabrication des cordages et des toiles à voiles, et de type M pour les renforts de composites, en association avec d'autres fibres comme le verre S2 par exemple. Les caractéristiques mécaniques du Vectran HS sont identiques à celle du Kevlar 29, mais elles sont très supérieures à celui-ci et au Spectra en ce qui concerne l'abrasion, le fluage et la résistance au pliage et à la courbure, en particulier en milieu humide. Les caractéristiques sont également excellentes en fatigue, absorption des vibrations et sous température. A noter que l'élévation de température conduit à un retrait, ce qui est particulièrement intéressant dans le cas de composites.

Pour les cordages et toiles à voiles, le choix de l'ensimage est très important et les structures tressées, qui permettent un meilleur alignement des fibres, sont préférables aux structures toronnées.

La fibre de carbone, ou graphite, existe en quatre nuances : haute résistance (H.R.), ultra-haute résistance (U.H.R.), haut module (H.M.) et ultra-haut module (U.H.M.). Les nuances H.R. ayant une résistance à la traction supérieure, mais un module d'élasticité inférieur aux nuances H.M.

Leur résistance à la traction est de toute façon assez proche de celle du verre, mais leur module d'élasticité est trois fois supérieur. Elles possèdent, de plus, une excellente résistance à la compression et à la fatigue qui les fait utiliser dans la construction de pales d'hélicoptère sans articulation. En revanche, elles ont une très mauvaise résistance à l'impact. Elles présentent également l'avantage d'accepter tous les types de résines. Mais, elles supportent très mal le tissage

et sont utilisées principalement en unidirectionnel.

Le TABLEAU 5-X résume les caractéristiques de différentes fibres vierges avant toute opération de tissage. Pour le verre E, par exemple, il ne faut pas oublier que la résistance en traction du fil tombe de 175 à 120 daN/mm² ce qui montre la perte importante qui résulte des opérations ultérieures.

Les graphiques de la FIGURE 5-38 et le TABLEAU 5-XI — d'origines différentes — montrent les résultats d'essais effectués sur des éprouvettes.

On remarquera la supériorité exceptionnelle du carbone dans toutes les conditions, sauf au choc, et la différence dans les performances de l'aramide en traction et compression.

C'est pourquoi ce dernier renfort n'est utilisé en tissage que lorsqu'il ne travaille qu'en traction, comme pour la peau intérieure d'un bordé en sandwich, sinon il est associé à du verre R ou du carbone pour constituer un hybride des deux matériaux.

De même, le carbone pourra être associé à du verre R ce qui, selon la proportion des deux composants améliorera soit la résistance au choc du premier, soit les performances en traction du second.

c ▪ Les techniques

Pour obtenir des constructions en sandwich une cohésion correcte, il est souvent nécessaire de faire appel à une imprégnation sous vide, que le moule soit mâle ou femelle. Un sac en plastique souple, non adhérent à la résine est placé sur le

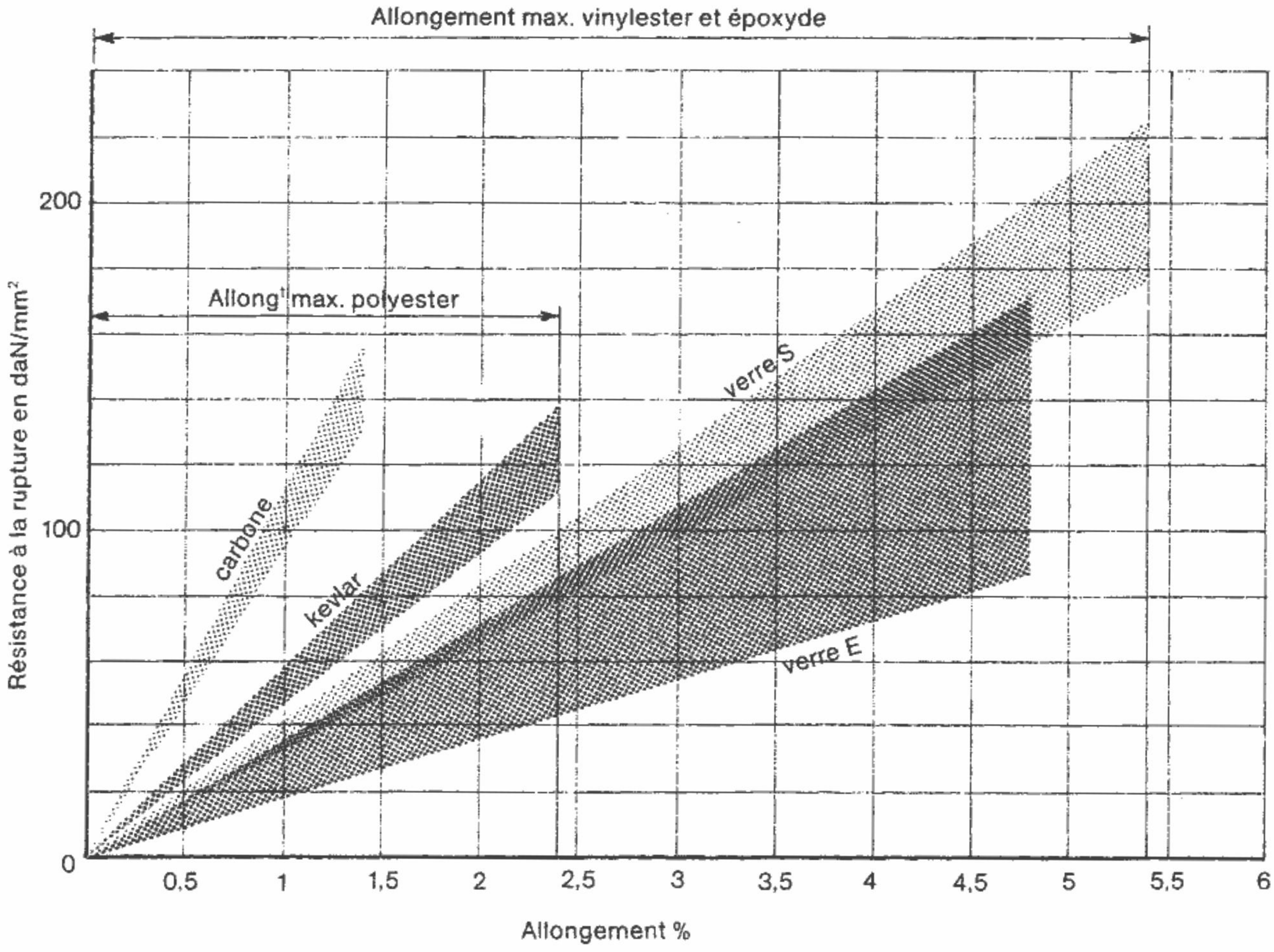


Fig. 5-38 • Comparaison de différentes combinaisons de renforts et de résines pour des stratifiés unidirectionnels à 50% de fibre. Les limites supérieures correspondent à des éprouvettes de laboratoire, les limites inférieures à la meilleure qualité que l'on puisse obtenir en chantier. On voit que, en dehors des problèmes de liaison, la résine polyester convient tout à fait pour la fibre de carbone et à la rigueur pour le Kevlar 49, bien que, pour celui-ci, le moindre défaut dans la résine conduira à un abaissement des performances. En revanche, seules les résines époxydes ou vinylesters permettent d'obtenir le maximum de la fibre de verre E ou S. (*D'après doc. Orcon Corp.*).

stratifié et scellé sur le pourtour du moule. Il est relié à une pompe maintenant un vide de 0,5 bar environ durant la polymérisation. Le trop-plein de résine, chassé par la pression du sac est absorbé, à travers un tissu pelable, par un tissu sec, tous deux étant arrachés après démoulage. Pour obtenir une bonne imprégnation, la résine est peu accélérée et, pour éviter un trop long temps de polymérisation, le moule est placé sous une tente où l'on élève progressivement la température aux environs de 40° C.

Parmi les procédés qui allient à la fois un matériau et une technique différents de ceux utilisés habituellement, se situe le moulage à chaud (120° C environ) de renforts pré-imprégnés. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une méthode nouvelle car elle est employée depuis longtemps dans l'industrie, mais son application à la construction de voiliers est récente.

Les pré-imprégnés peuvent être à base de fibres aussi diverses que le verre, les polyamides haute température, le carbone, l'aramide, etc., tissées de façon classique ou en unidirectionnel, mais aussi parfois dans des structures en trois dimensions.

Les résines d'imprégnation sont, selon les usages, des silicones, des polyamides, des phénoliques ou, pour notre cas, des polyesters ou des époxydes.

Ces résines, catalysées mais non accélérées, polymérisent à la chaleur dans un four. La durée de vie avant usage est d'environ six mois, ce qui nécessite souvent une conservation en chambre froide.

La tenue sur le moule est généralement assurée par un « sac à vide » constitué d'une peau en plastique enveloppant le moulage et sous laquelle on fait le vide. Le moule est alors roulé dans le four où s'effectuera la polymérisation.

Sur le plan mécanique, les pré-imprégnés offrent les avantages d'une parfaite régularité de l'imprégnation et d'un taux de verre qui atteint facilement près de 66 %, ce qui conduit à des performances pratiquement impossibles à atteindre dans le moulage à la main. Seul inconvénient, le prix du produit et surtout de l'outillage ! Mais ce dernier facteur pourrait évoluer avec la venue de résines polymérisant à la lumière. Le progrès n'est pas près de s'arrêter dans ce domaine. C'est ainsi que dans des réalisations récentes de grandes dimensions, on a pu éliminer l'étuve en utilisant directement la fibre de carbone des renforts comme résistance chauffante (procédé Hexcel Génin).

Dernière technique de fabrication que nous citerons, le moulage par injection. Les renforts et les résines sont classiques mais l'imprégnation est complètement différente.

Sur le moule mâle, ou poinçon, sont disposés, après l'application d'un gelcoat, tous les renforts.

Le tout est recouvert par un moule femelle, ou matrice, qui a également reçu un gelcoat. Le vide est alors fait entre les deux moules, aspirant la résine qui est injectée en différents points. Lorsque celle-ci est polymérisée, il ne reste plus qu'à démouler pour obtenir une coque à l'aspect parfait sur ses deux faces et portant toutes ses membrures et renforts divers. En dehors de la qualité de l'aspect, le procédé offre l'avantage d'un temps de fabrication écourté, d'un très bon contrôle du poids de résine utilisé, donc du taux de verre et du poids final de la coque. Son emploi se heurte en revanche à deux grosses difficultés : tout d'abord, la mise au point de l'emplacement des prises de vide et des points d'injection de résine pour obtenir une imprégnation homogène de toute la surface et, surtout, le prix des deux moules qui requièrent une précision et une rigidité très grandes, même si la pression atmosphérique qui s'exerce sur chacun d'eux assure un certain serrage des renforts.

Cette technique, mise au point en Grande-Bretagne par la société Scott Bader et développée dans l'industrie automobile sur les voitures Lotus, a été appliquée pour la première fois en 1974 sur un bateau à moteur de 14 m. Utilisée par le chantier Jeremy Rogers pour la construction des Contessa 29 et 34 il ne semble pas qu'elle ait connu dans ce domaine l'avenir que certains présageaient et l'utilisation des pré-imprégnés paraît offrir plus de promesses.

Le problème est avant tout économique et réside dans la possibilité d'amortissement des outillages, d'autant plus faible qu'il s'agit de plus grandes unités.

Elle est par contre tout à fait envisageable pour des pièces de dimensions relativement restreintes telle que safran, capots, etc. Il est possible dans ces cas de réaliser la pièce autour d'un noyau de mousse prémoulé pour obtenir une pièce extrêmement résistante et légère. ⚓

BIBLIOGRAPHIE - CHAPITRE 5 •••

1 • R.M. Steward :
Construction des bateaux en bois.
EMOM - Epuisé.

2 • H. Dervin :
Traité pratique pour la construction des bateaux en bois.
Ed. du Chasse-Marée.

3 • H. Dervin :
Notes pratiques sur la construction des navires en bois.
Le Yacht. Epuisé.

4 • H.I. Chapelle :
Boatbuilding.
Norton (USA).

5 • L.F. Herreshoff :
The common sense of yacht design.
The Rudder (USA).

6 • F.S. Kinney :
Skene's elements of yacht design.
A & C Black - (Londres).

7 • P. Gutelle :
Les méthodes modernes pour construire son bateau en bois.
EMOM - Épuisé.

8 • M. Baptista :
Le matériau bois.
Réf. Dossier 11 - Loisirs Nautiques.

9 • C. Buhagiar, F. Sergent & G. Romigou :
La construction bois-latté époxy.
Réf. Dossier 8 - Loisirs Nautiques.

10 • J.Y. Poirier :
Le composite bois-époxy.
Réf. Dossier 10 - Loisirs Nautiques.

11 • J.P. Villenave :
La construction contreplaqué :
Réf. Hors Série 27 - Loisirs Nautiques.

12 • P. Bertrand :
Connaissance de la construction moderne des bateaux en bois.
Réf. Hors Série 4 - Loisirs Nautiques.

13 • W. Zantvoort :
Series in steel. Symposium Yacht architecture.
1975. Hiswa.

14 • S. Langevin :
Voiliers et vedettes en métal.
Arthaud.

15 • G. Caroff :
Alu-Acier-Inox.
Réf. Hors Série 16 - Loisirs Nautiques.

16 • S. Kernilis :
Construction amateur d'un bateau en acier.
EMOM - Épuisé.

17 • J.C. Musnier :
Construire son bateau en acier.
Arthaud - Epuisé.

18 • C. Vargel :
Le comportement de l'aluminium et ses alliages.
Dunod technique.

19 • P.F. Laval :
La construction polyester.
Réf, Hors Série 10 - Loisirs Nautiques.

6

MÂTURE, GRÉEMENT ET VOILURE

LA démarche suivie dans ce chapitre paraîtra peut-être illogique puisqu'elle va consister à étudier la mâture et le gréement avant le plan de voilure.

On verra qu'il n'en est rien, puisqu'elle permettra de mieux comprendre les restrictions imposées par la mécanique du gréement à la définition du plan de voilure. Avant de savoir quoi dessiner, il faut comprendre pourquoi on le dessine et avoir en permanence à l'esprit les contraintes spécifiques.

De tous les éléments constituant le voilier, l'ensemble mâture et gréement est certainement celui qui est la cause du plus grand nombre d'accidents, surtout en course, où l'on cherche toujours à en réduire au minimum le poids, non seulement pour améliorer la stabilité, mais surtout pour diminuer le moment d'inertie, facteur extrêmement négatif pour la marche du bateau.

Il existe de nombreuses méthodes de calcul, plus ou moins simplifiées, de l'échantillonnage des mâts et de leur gréement, ainsi que des abaques établis par des fabricants de mâts. Cependant, ceux-ci ne donnent tous que des résultats relativement imprécis en raison de la méconnaissance de deux éléments fondamentaux indispensables pour effectuer ces calculs : la mécanique de l'ensemble voiles-mât-gréement, et la valeur des efforts statiques et dynamiques.

A la seconde question, il ne sera possible de répondre qu'en s'appuyant sur des séries de mesures *in situ* dans toutes sortes de conditions et pour des tailles et des types de voiliers et de gréements aussi différents que possible.

Actuellement, très peu d'études de ce genre ont été menées à bien, la plupart dans le cadre de la coupe de l'America, donc pour deux types particuliers de voiliers : les 12 m J.I. et les Class America, et encore moins publiées.

D'autre part, de telles études n'ont de valeur et de portée pratique que si elles sont définies et analysées en fonction d'une connaissance correcte de la mécanique du système. C'est donc par là que nous allons commencer.

A ■ LA MÉCANIQUE DU GRÉEMENT

La compréhension de la mécanique d'un gréement résulte de la réunion de la connaissance d'un certain nombre d'éléments disparates.

Nous commencerons donc par analyser ceux-ci pour en constituer une sorte de puzzle d'où émergera une théorie complète.

1 ■ COMPORTEMENT D'UN CÂBLE SOUMIS À UN EFFORT TRANSVERSAL

Si l'on considère un câble horizontal attaché entre deux points et supportant une charge **P** (FIGURE 6-1), celle-ci

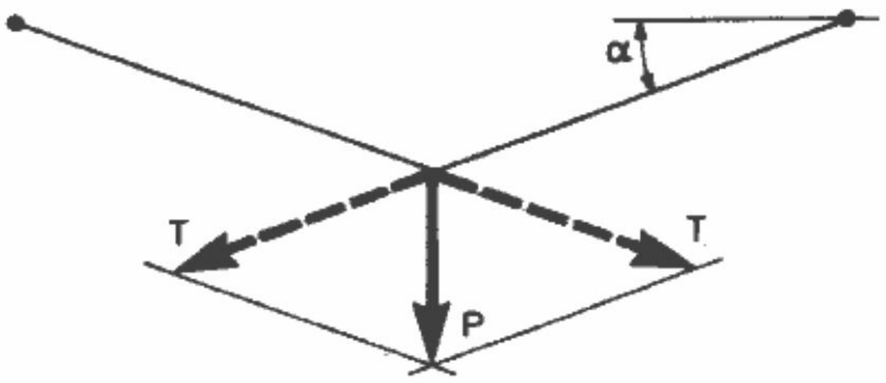


Fig. 6-1 • La traction dans un câble supportant une charge localisée est fonction de l'angle qu'il prend avec l'horizontale et vice versa.

induira dans le câble une tension **T** fonction de l'angle entre les deux parties adjacentes du câble *. Si α est l'angle que fait le câble avec l'horizontale :

$T = P/2 \sin \alpha$

On voit tout de suite que pour une charge donnée, plus l'angle α sera réduit, plus la tension **T** sera élevée ; elle tend vers ∞ quand α tend vers 0 (TABLEAU **6-1**).

TABLEAU 6/I

α	1/2 sin α
30	1
15	1,93
10	2,88
5	5,74
2	14,33
1	28,65

Si maintenant, au lieu d'une charge ponctuelle, nous la répartissons uniformément sur une certaine longueur du câble, celui-ci prendra sur la distance correspondante une courbe en forme de chaînette (FIGURE **6-2**).

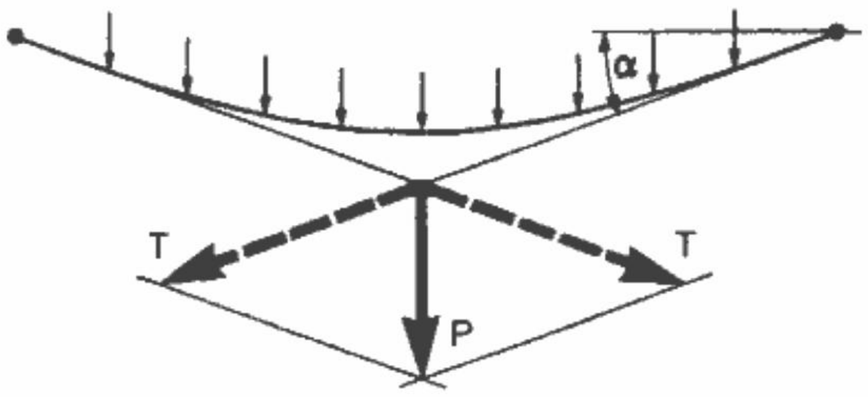


Fig. 6-2 • Lorsque le câble supporte une charge uniformément répartie sur une partie de sa longueur, l'angle qu'il prend à ses extrémités est le même que si une charge égale était appliquée localement.

* Dans cette démonstration, nous supposons le poids du câble comme négligeable.

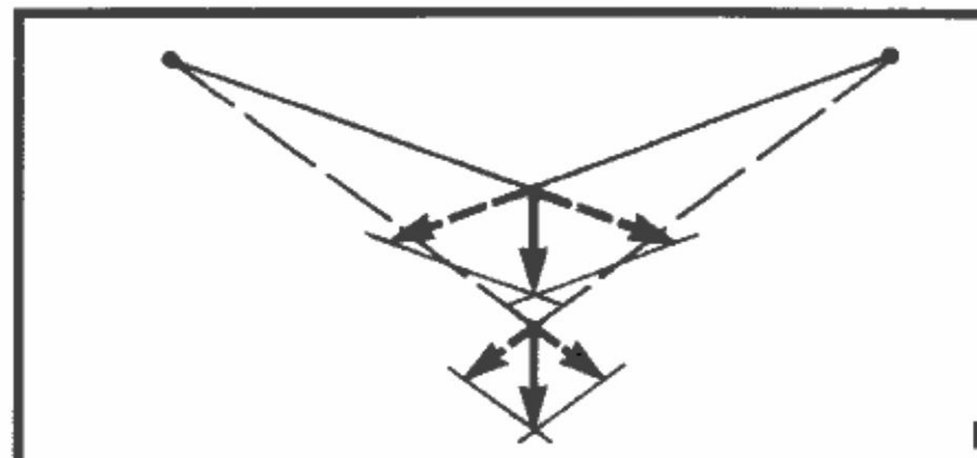


Fig. A

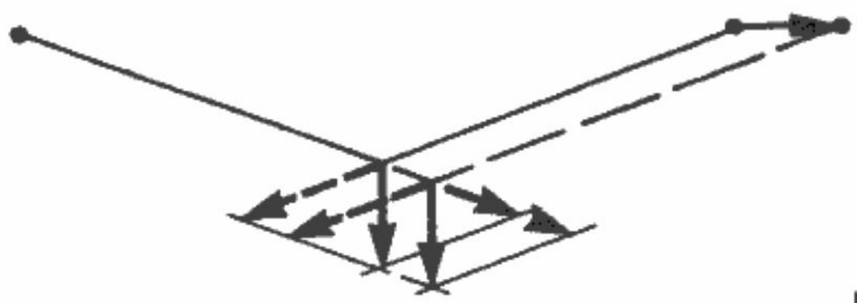


Fig. B

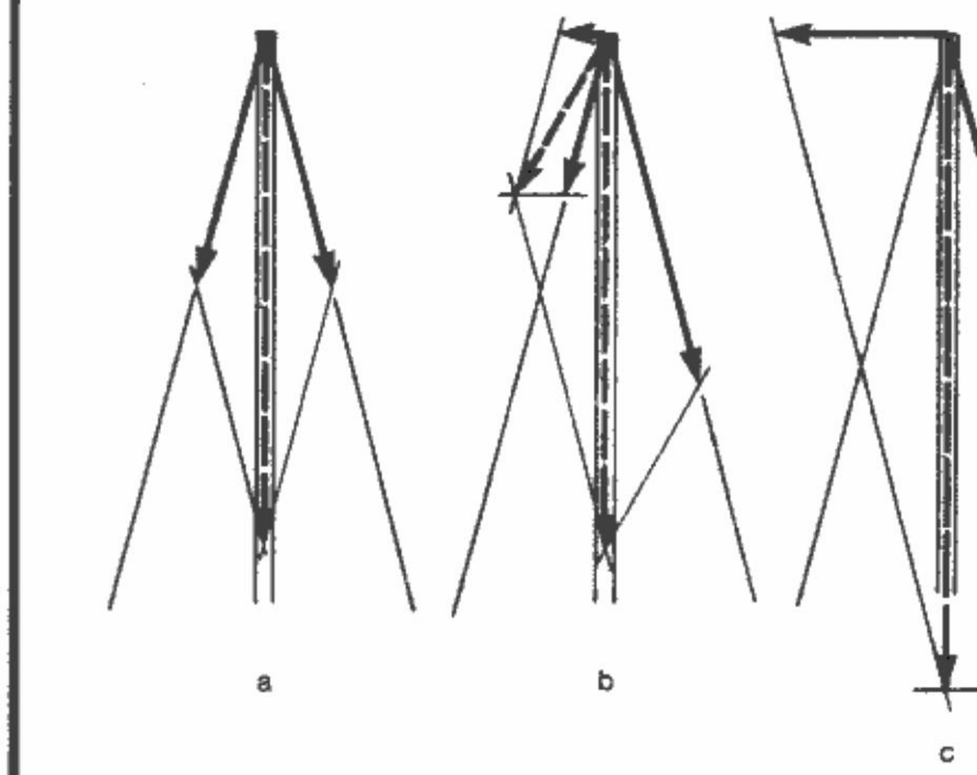


Fig. C

ÉTAI RAIDE, ÉTAI MOU

Beaucoup de controverses se développent autour du problème de la raideur de l'étai des voiliers du fait que les idées sur cette question ne sont pas toujours très claires.

Ce que nous venons d'exposer doit permettre de mieux comprendre les éléments dont il faut tenir compte.

Si nous considérons un ensemble dont la rigidité assure une quasi stabilité de la distance entre les points d'attache du câble, la flèche que celui-ci prendra sera fonction de son élasticité; plus celle-ci sera grande, plus la flèche sera importante, mais moins la tension dans le câble sera élevée (du fait de l'augmentation de l'angle α (FIGURE A).

Si nous considérons maintenant que la distance entre les points n'est plus fixe, mais que c'est la tension qui est constante, le rapport flèche/corde restera constant comme l'angle α (FIGURE B).

Il est manifeste que l'étai d'un voilier entre dans le second cas, puisque l'ensemble coque-mât ne peut être considéré comme rigide et que la tenue de l'étai n'est assurée que par la tension du galhauban, du pataras et la traction de la grand-voile. Si la tension du premier ne peut être définie qu'*a priori*, les deux autres disposent de toutes sortes de mécanismes (palans, ridoirs à volant, vérin hydraulique) pour équilibrer la traction de l'étai pendant la marche.

Au fur et à mesure que la force du vent et la traction dans l'étai vont croître, la traction de la grand-voile croîtra aussi, et il suffira d'augmenter la tension du pataras pour maintenir constant le rapport flèche/corde de l'étai.

Le déplacement longitudinal de la tête se fera de façon régulière vers l'arrière.

L'utilisation d'une barre à la place d'un câble permettrait de réduire ce déplacement qui, en augmentant la quête, tend à rendre le voilier plus ardent, ce qu'il n'a déjà que trop tendance à devenir lorsque le vent forcit.

Néanmoins, compte tenu des fortes accélérations longitudinales auxquelles est soumis le gréement, il faut conserver une certaine élasticité à l'étai et je partage sur ce point l'opinion de Rod STEPHENS qui préconisait pour celui-ci l'emploi du câble monotoron.

Cette élasticité a d'ailleurs pour autre avantage, en amortissant les mouvements du foc, de maintenir une certaine stabilité des écoulements aérodynamiques sur la voile.

LES EFFETS DE LA PRÉTENSION DES HAUBANS

Il est intéressant de voir à cette occasion comment va se comporter l'ensemble mât-gréement de tête.

A l'arrêt, une prétension importante est appliquée sur les galhaubans, laquelle va résulter en une compression dans le mât (FIGURE C-a).

Lorsque le voilier entrera en mouvement, la composante latérale de l'ensemble étai-drisse-grand-voile transfère une partie de la tension du galhauban sous le vent au galhauban au vent.

Néanmoins, la résultante de compression dans le mât reste constante FIGURE C-b, ceci jusqu'à ce que la totalité de la tension dans l'un soit passée dans l'autre.

Au cours de ces deux phases, la compression dans le mât (tout au moins pour la part due au galhauban) restant constante, celle-ci ne provoquera pas de raccourcissement supplémentaire du mât et le déplacement sous le vent de la tête ne sera tributaire que de l'allongement du galhauban.

Au-delà, la tension du galhauban continuera de croître mais aussi la compression dans le mât (FIGURE C-c).

Celui-ci se raccourcira, d'où un déplacement sous le vent de la tête de mât de plus en plus important.

Il est donc nécessaire pour la stabilité des réglages que l'ensemble mât et galhaubans soit le moins élastique possible d'où l'intérêt, pour ces derniers, de la barre ronde ou profilée, dont l'allongement est aux environs de 1/1,5 de celui d'un câble monotoron. ■

Dans ce cas, les prolongements du câble au-delà de la partie portant la charge sont tangents à ses extrémités et la tension est toujours : $\mathbf{T = P/2 \sin \alpha}$, **P** étant alors le total de la charge répartie sur le câble.

La flèche maximum $\mathbf{f_m = 0{,}25\ l \times \tan \alpha}$

Il en serait de même si la charge n'était pas uniformément répartie, mais alors la forme de la courbe serait différente de même que sa flèche maximum.

Troisième cas, nous ajoutons à chaque extrémité de la partie du câble soumise à la charge uniformément répartie une charge ponctuelle (FIGURE 6-3). Aux deux points considérés, les prolongements du câble ne seront plus tangents à la courbe mais seront dirigés selon la résultante de la tension dans le câble et de la charge ponctuelle.

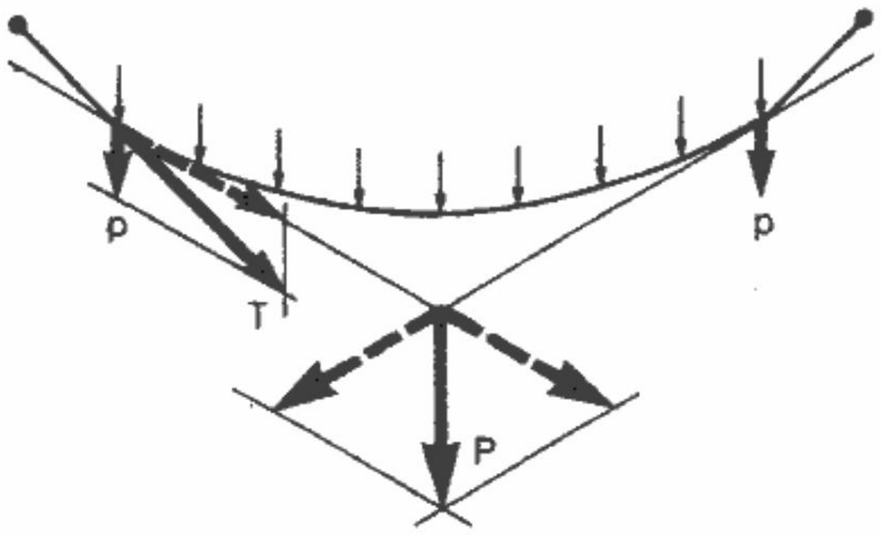


Fig. 6-3 • Une charge locale appliquée à l'extrémité de la partie supportant la charge répartie modifie la direction de la tension du câble selon la résultante de la charge locale et de la tension initiale due à la charge répartie.

2 RÉPARTITION DES EFFORTS DANS LE TISSU D'UNE VOILE

Nous savons que chaque élément de la surface d'une voile est soumis à un effort dû à la différence de pression dans les écoulements de l'air sur ses deux faces.

Si la voile était une sphère, cet effort se répartirait uniformément tout autour de l'élément de calotte sphérique correspondant, selon un cône ayant pour axe la direction de l'effort et dont la surface tangenterait la sphère à la limite de la surface considérée (FIGURE 6-4).

Vue en plan, la répartition de cet effort rayonnerait uniformément autour de son point d'application.

Le problème est le même que le précédent sinon qu'au lieu de s'appliquer à une simple droite, il intéresse maintenant une surface circulaire.

La tension par unité de longueur sur la circonférence de la surface considérée est alors :

$\mathbf{T = 4P/\sqrt{4\pi S} \sin \alpha}$

$\sqrt{\mathbf{4\pi S}}$ étant la longueur de la circonférence de surface **S** et α l'angle de la génératrice du cône avec la surface.

En fait, pour de multiples raisons liées à la forme de la voile (cambrure différente dans le sens transversal et vertical), raideur du tissu, tension dans le guindant, la répartition de l'effort dans le tissu se fait selon une ellipse très aplatie et la tension tend vers une valeur $\mathbf{T = P/2 \sin \alpha}$ par unité de largeur.

3 DÉCOMPOSITION DES EFFORTS DANS UN FOC

La résultante des forces aérodynamiques agissant sur un foc est une force sensiblement perpendiculaire à la surface plane appuyée sur les trois points de drisse, d'amure et d'écoute. Si les pressions étaient réparties uniformément sur la voile, cette résultante passerait par le centre de gravité du triangle défini par les trois points d'attache. A l'intérieur même de la surface de la voile, les tensions se répartissent comme nous l'avons vu précédemment, résultant, en chaque côté du triangle, en efforts longitudinaux et normaux à l'intérieur des trois triangles ayant pour sommet le centre de gravité et pour base le guindant, la chute et la bordure (FIGURE 6-5).

Le long de chaque ralingue se développeront donc une tension longitudinale et un effort normal réparti sur toute la longueur, tous deux d'origine aérodynamique. Ce dernier agissant sur la ralingue, comme dans la FIGURE 6-2, induira une autre tension longitudinale, d'origine mécanique cette fois, s'ajoutant à la précédente.

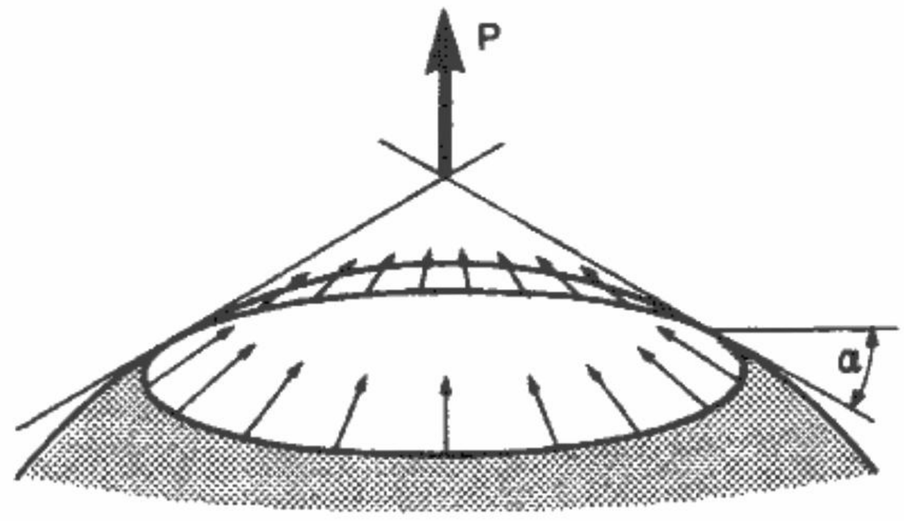


Fig. 6-4 • La résultante d'une pression **P** exercée sur une calotte sphérique est une charge uniformément répartie sur le pourtour de celle-ci.

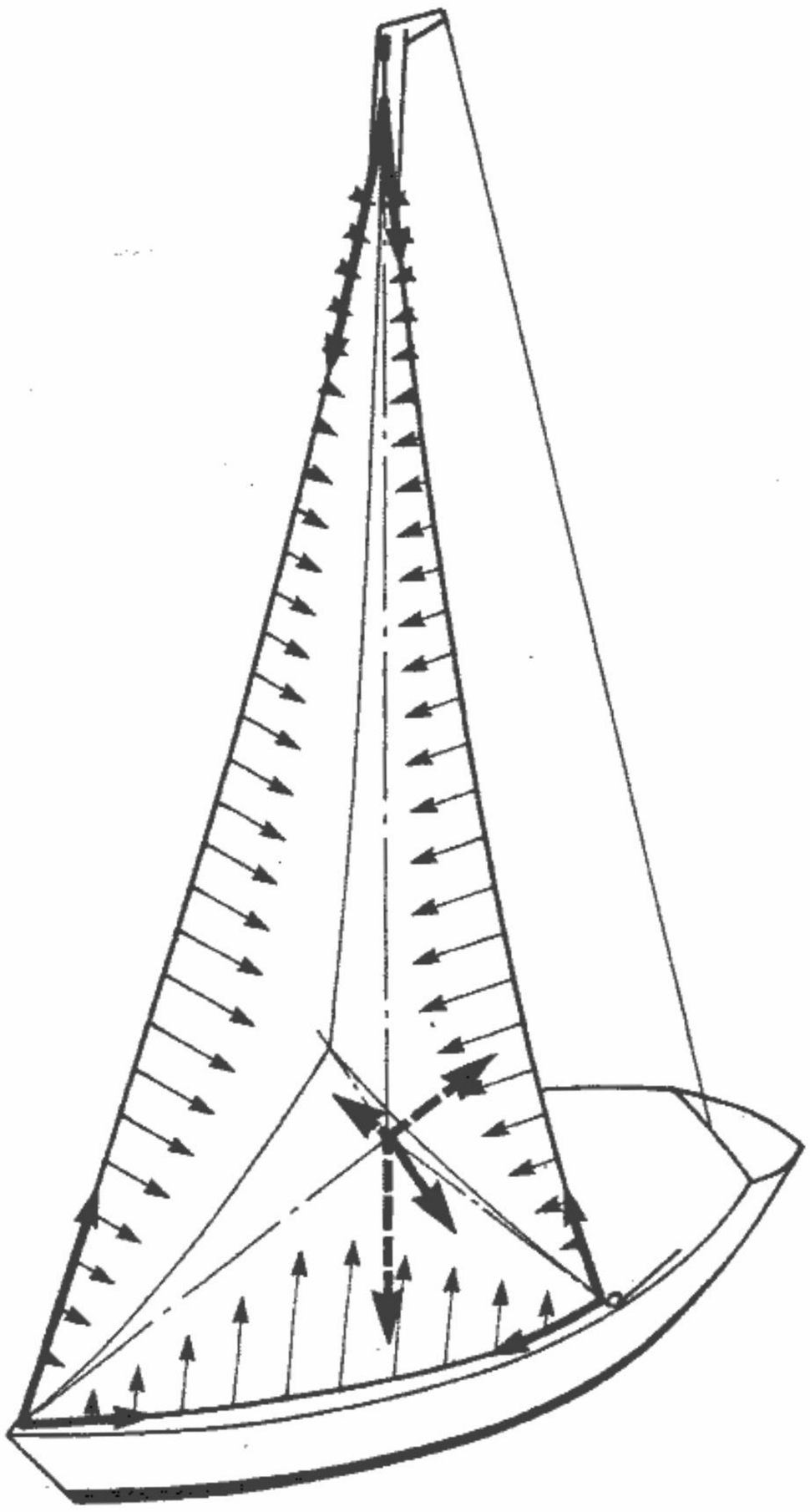


Fig. 6-5 • La force aérodynamique développée par un foc se décompose en trois forces tangentes aux trois points de la voile et dont la direction est matérialisée par la drisse, l'écoute et l'attache du point d'amure.
Les tensions développées dans le tissu se décomposent en efforts normaux et parallèles aux trois côtés de la voile.

Le tout se traduit par trois forces appliquées aux trois points de la voile, concourantes, tangentes à la voile en ceux-ci et dont la résultante est la force aérodynamique.

Dans la réalité, la répartition non uniforme des pressions, la forme donnée par le voilier à la voile, l'accroissement de tension dans le guindant (destinée à préserver ou à modifier celle-ci) font que la résultante aérodynamique ne correspond pas au centre de gravité de la surface. Il n'en demeure pas moins que sa décomposition aux trois points de la voile reste matérialisée par la direction de l'étai (ou de la drisse), de la pantoire d'amure (lorsqu'il y en a une) et de l'écoute, et que toutes ces directions sont tangentes à la voile en ces points.

4 DÉCOMPOSITION DES EFFORTS DANS UNE GRAND-VOILE

Si la grand-voile n'était fixée qu'en ses trois points, le problème serait le même que pour un foc. La raison de la différence tient dans le fait que deux des trois côtés, le guindant et la bordure, sont envergués sur le mât et la bôme.

Les contraintes dans le tissu supportées par ces ralingues sont donc encaissées par les espars sans qu'il soit besoin de les équilibrer par une tension longitudinale. Nous ne sommes plus dans le cas du câble du **§ 1 - PAGE 77**, celui-ci est remplacé par un élément rigide assurant par sa raideur sa propre résistance à la flexion. Les efforts longitudinaux dans ces ralingues sont donc beaucoup plus faibles et leur tension, en plus de l'équilibre des composantes aérodynamiques longitudinales, est destinée à provoquer la déformation du tissu pour maintenir la forme de la voile.

Il en va tout autrement pour la chute dont les efforts normaux doivent être équilibrés par une tension longitudinale, comme dans le cas du foc.

C'est essentiellement cette tension qui sera encaissée par la drisse et par le point d'écoute.

Les efforts normaux qui s'exerceront sur les espars auront donc deux origines bien distinctes :

- d'une part, ceux dus à la partie adjacente de la voile qui se répartiront sensiblement selon un triangle dont le sommet est à hauteur du centre de pression aérodynamique (**FIGURE 6-6 a**);

- d'autre part ceux dus à la tension de la chute qui vont en décroissant des points de drisse et d'écoute vers le point d'amure (**FIGURE 6-6 b**). Les deux s'ajoutant en donnant une répartition en forme d'amphore (**FIGURE 6-6 c**).

En chaque point de la ralingue, la force correspondante est bien sûr tangente à la voile et l'angle de celle-ci avec le plan général de la voile déterminera les composantes longitudinales et latérales agissant sur le mât et la bôme. Dès que l'on veut calculer avec précision la section d'un mât, il est impossible d'ignorer les contraintes de flexion qu'elles induisent dans celui-ci. On ne dispose malheureusement d'aucun renseignement précis sur leur valeur, leur direction et leur répartition verticale, non seulement selon les allures et les forces de vent, mais aussi selon la configuration de réduction de la voile qui provoque un déplacement de leur répartition.

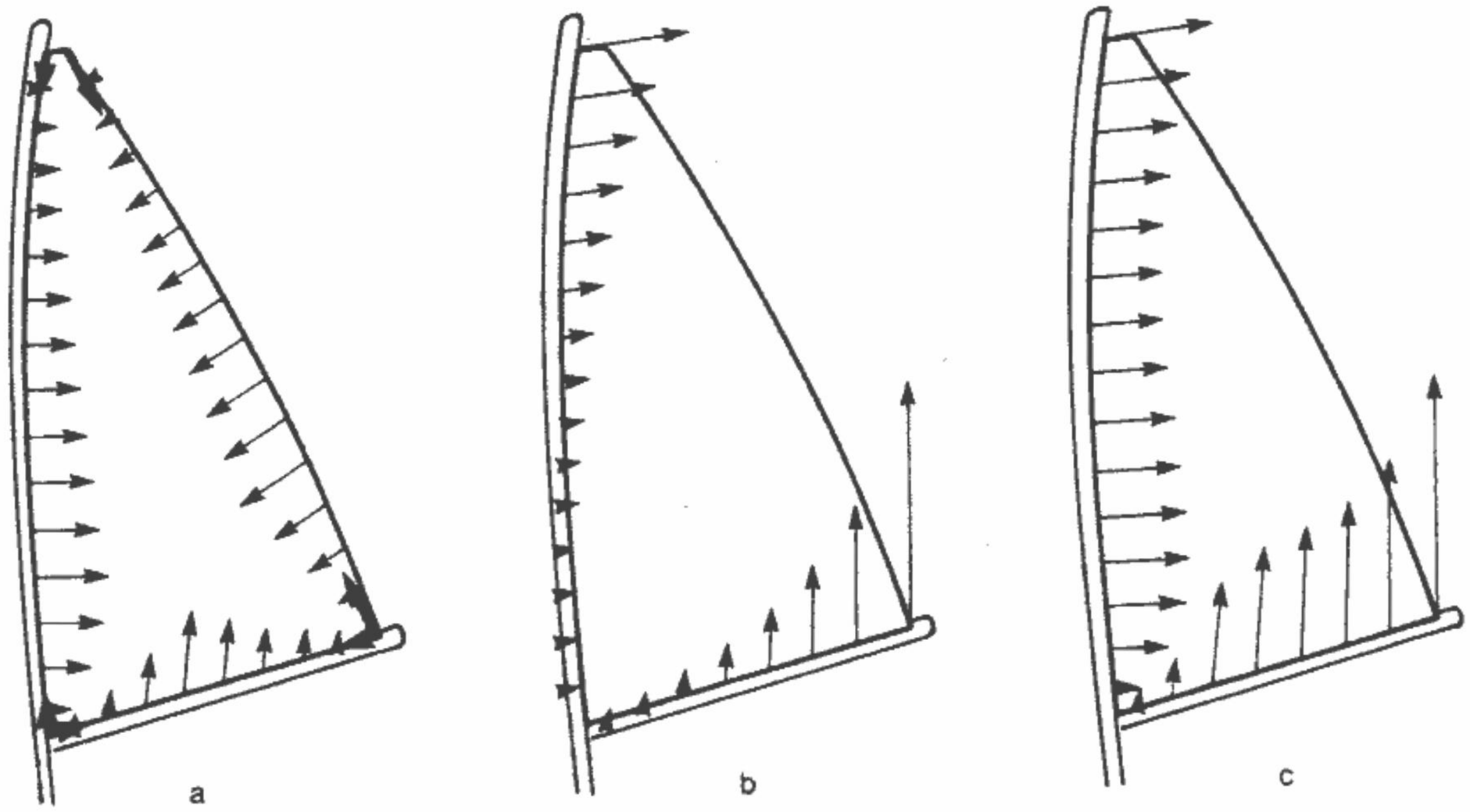


Fig. 6-6 • Dans une grand-voile, les tensions dans le tissu se décomposent en efforts normaux et parallèles aux trois côtés (**a**). Mais alors que sur le guindant et la bordure les efforts normaux sont repris par des espars, sur la chute, il faut exercer une forte tension pour les équilibrer. Ces tensions se décomposent d'une part en efforts de compression dans les espars et, d'autre part, en efforts normaux décroissant des points de drisse et d'écoute vers le point d'amure (**b**). La somme de tous ces efforts normaux se compose selon une forme voisine de celle représentée en (**c**), les surfaces enveloppes de ces forces étant tangentes à celle de la voile le long de chacun des espars.

C'est là une des causes les plus méconnues de rupture de mât, en particulier pour les mâts souples qui ne peuvent travailler en flambage comme une simple colonne, mais en compression et flexion combinées, cette dernière n'étant équilibrée que grâce à la présence de la voile et éventuellement de bastaques.

5 LES DIFFÉRENTS NŒUDS ET PANNEAUX D'UN MÂT

Il nous faut maintenant faire l'analyse des efforts agissant sur les différentes parties d'un mât, analyse qui sera décomposée, comme il est coutumier de le faire, selon les deux plans, axial et transversal. C'est à partir de celle-ci que nous pourrons comprendre comment il travaille réellement.

Pour simplifier, nous considérerons tout d'abord un mât destiné à un gréement en tête sur un bateau naviguant au près (FIGURE **6-7**) car c'est l'allure à laquelle les efforts sont les plus élevés.

a ▪ La tête et le panneau supérieur du mât

On y trouvera :

• l'ensemble étai et drisse (**A**) dont la traction s'exercera vers le bas, l'avant et sous le vent. On pourra décomposer celle-ci en trois forces : une verticale selon l'axe du mât, une latérale sous le vent et une longitudinale vers l'avant. A la force verticale, il faudra ajouter le retour de la drisse de foc.

Il faut noter que l'angle, dans le plan longitudinal, entre l'étai et le mât qui, sur un plan de voilure normal se situe aux environs de 20°, se trouve en réalité considérablement réduit, pouvant atteindre des valeurs inférieures à 10°, du fait de la flèche de l'étai et du recul du point de drisse provoqué par la traction de la chute. La réduction sera encore plus dramatique avec un mât souple en raison de l'inclinaison du sommet vers l'arrière.

• Le pataras (**B**) assure, au moins partiellement, l'équilibre de la traction longitudinale de l'ensemble précédent. Sa traction se décompose en une force verticale et une force longitudinale dirigée vers l'arrière.

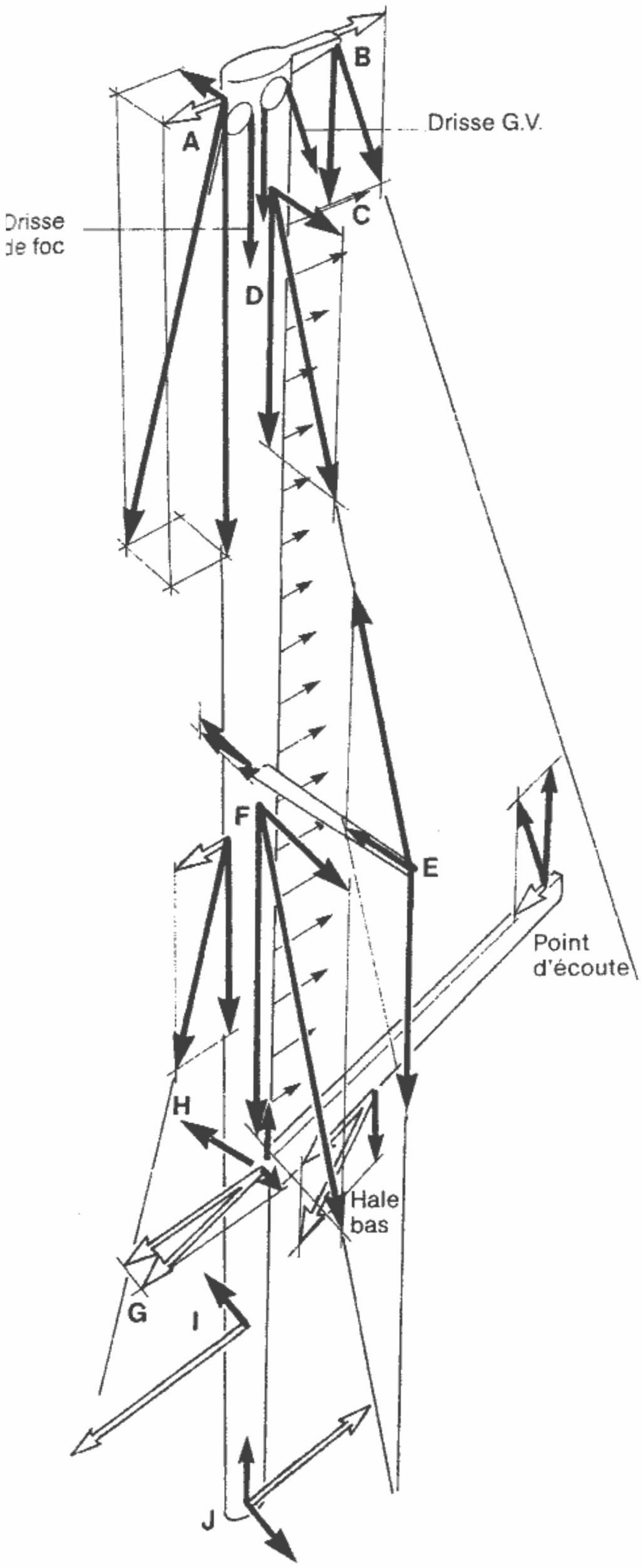


Fig. 6-7 • Les différentes forces s'exerçant sur le mât, vues du côté « au vent ». Les composantes latérales de la force exercée par la grand-voile ne sont pas représentées car elles sont cachées par le mât. La longueur des flèches représentant les vecteurs force n'a aucune prétention à une exactitude quelconque, mais est purement indicative. Les forces latérales et longitudinales représentées en **I** (étambrai) et **J** (pied de mât) sont les actions exercées par le mât sur la coque.

Lorsque le pataras est double, il existe une composante latérale au vent, mais très réduite du fait du faible écartement des deux câbles.

Un point important est à noter ici. La résultante totale des tractions longitudinales du pataras et de l'étai, en particulier si l'angle longitudinal du pataras est faible ou s'il est fixé à l'extrémité d'une potence longue, ne se trouvera qu'exceptionnellement en accord avec le centre de gravité de la section du mât. Leur décalage entraînera un moment de flexion, qui peut être important pour l'équilibre du mât, et un moment de torsion.

• La grand-voile (**C**) exerce d'une part, par sa drisse (dont il ne faut pas omettre le retour), une traction verticale incluant la composante verticale de la traction de la chute et, d'autre part, une traction horizontale répartie sur la hauteur du panneau et que l'on décomposera latéralement, sous le vent, et longitudinalement vers l'arrière.

Cette traction induira dans cette partie du mât des contraintes de flexion longitudinale et latérale.

• Le galhauban (**D**) est destiné à équilibrer les efforts latéraux dirigés sous le vent. Du fait de son angle, il induira une composante de compression dans le mât.

b ▪ Le capelage intermédiaire

A ce niveau on trouvera :

• La barre de flèche (**E**) qui renvoie le galhauban à la verticale. Elle est de ce fait soumise à un effort de compression. Pour éviter toute autre contrainte dans le plan vertical, elle est calée selon la bissectrice de l'angle du galhauban. Elle induit donc une petite composante verticale dans le mât.

Son effort de compression sur le mât doit être réparti sur la plus grande surface longitudinale possible afin d'éviter tout risque de déformation. Le haubanage intermédiaire (**F**), quelle que soit sa disposition, possède plusieurs fonctions :

- dans le sens transversal, il équilibre d'une part la compression de la barre de flèche, et d'autre part une partie de la traction latérale de la grand-voile ;

- dans le sens longitudinal, il doit équilibrer la traction longitudinale de la grand-voile, dirigée vers l'arrière mais aussi limiter les mouvements du mât vers l'avant ou l'arrière provoqués par les efforts dynamiques. Il doit également participer à l'équilibre des efforts longitudinaux et transversaux de la bôme et du tangon. Il doit donc assurer un positionnement omnidirectionnel du mât dans le plan horizontal. Cela implique de disposer de chaque bord deux bas-haubans, ou un bas-hauban avec du pied sur l'arrière et un bas étai.

Cependant, dans certaines conditions, la fonction d'équilibre des efforts longitudinaux de la grand-voile peut être assurée par la bôme seule ou avec l'aide d'un moment de

flexion appliqué en tête de mât par décalage de l'étai par rapport au pataras ou même grâce à la grand-voile.

c ▪ Le panneau inférieur et le vit de mulet

Lorsque le mât possède plusieurs étages de barres de flèche, le processus précédemment décrit se retrouve au niveau de chacune et des panneaux adjacents, c'est pourquoi nous passerons directement au panneau inférieur limité par le vit de mulet sur lequel s'articule la bôme.

• Dans ce panneau, nous retrouvons toujours les forces de flexion induites par la grand-voile.

• L'effort (**G**) que la bôme exerce sur le mât a deux origines : d'une part la composante horizontale de la traction dans la chute au point d'écoute (l'équivalent de la traction verticale sur la drisse), d'autre part la composante horizontale de la traction du hale-bas.

Si l'écoute de grand-voile ne tire pas exactement dans un plan vertical transversal, apparaîtra une composante de compression (positive ou négative selon l'orientation) qui viendra s'ajouter à celle du hale-bas.

L'orientation de la bôme décompose cet effort de compression en une force latérale au vent (faible au près) et une force longitudinale vers l'avant. Celles-ci équilibreront une partie des forces exercées par la grand-voile.

Au vit de mulet, on aura également un effort transversal (**H**) dirigé sous le vent et perpendiculaire à la bôme, représentant la part des efforts latéraux de la voile exercée sur la bôme en ce point, l'autre part étant équilibrée par la composante latérale de la traction de l'écoute. Sa valeur variera en fonction de la position relative du point d'attache de l'écoute et de la résultante des forces latérales exercées sur la bôme. Cette composante tend à s'annuler lorsque le point de tire de l'écoute avance vers le milieu de la bôme.

Les composantes latérales et longitudinales de **H** (non représentées sur la figure) dépendront de l'angle de la bôme.

La composante verticale du hale-bas en son point de fixation agira en compression de bas en haut directement à partir de celui-ci s'il est fixé sur le mât, ou à partir du pied de mât, dans le cas contraire. On trouvera également au vit de mulet un effort de compression de bas en haut résultant de l'équilibre des tractions dans le guindant de la grand-voile.

d ▪ Le pied de mât

On retrouvera au pied de mât la résultante de toutes les forces de compression ainsi que des forces latérale et longitudinale équilibrées par des réactions correspondantes.

Dans le cas où le mât traverse un étambrai (**I**), celui-ci agira comme un élément d'encastrement et sa réaction

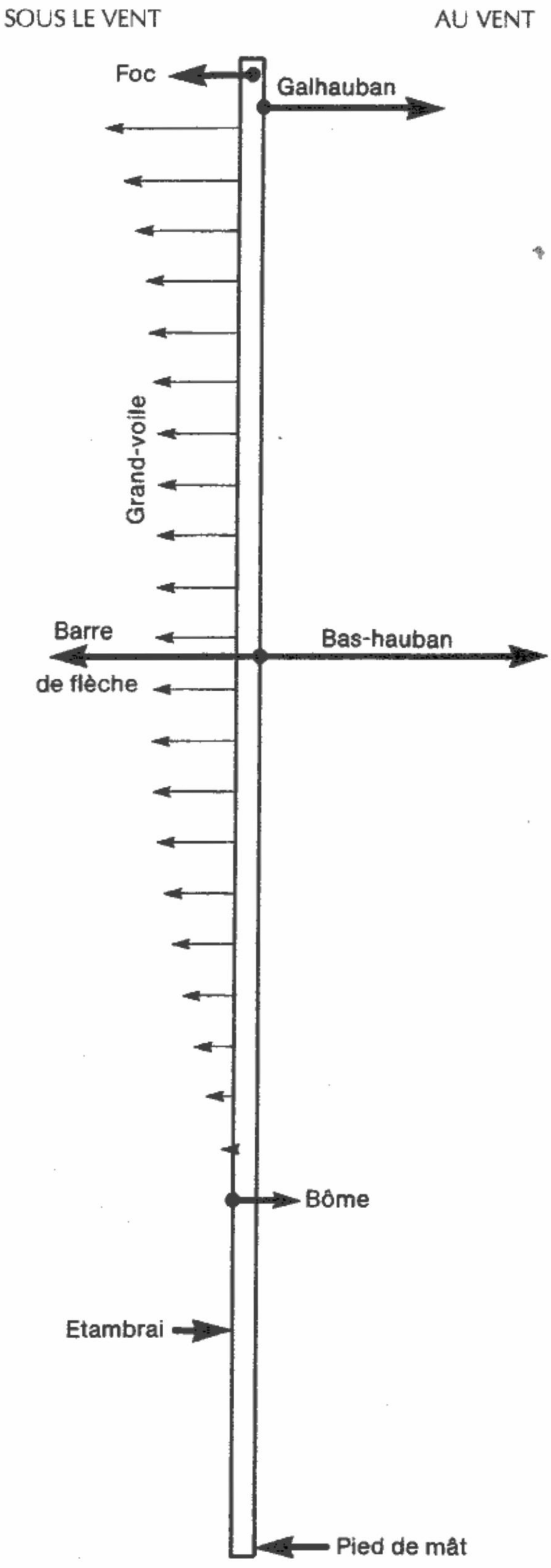


Fig. 6-8 • Résumé des différentes forces s'exerçant latéralement sur le mât. La force exercée par la bôme peut être positive ou négative, selon la position du point d'attache de l'écoute.

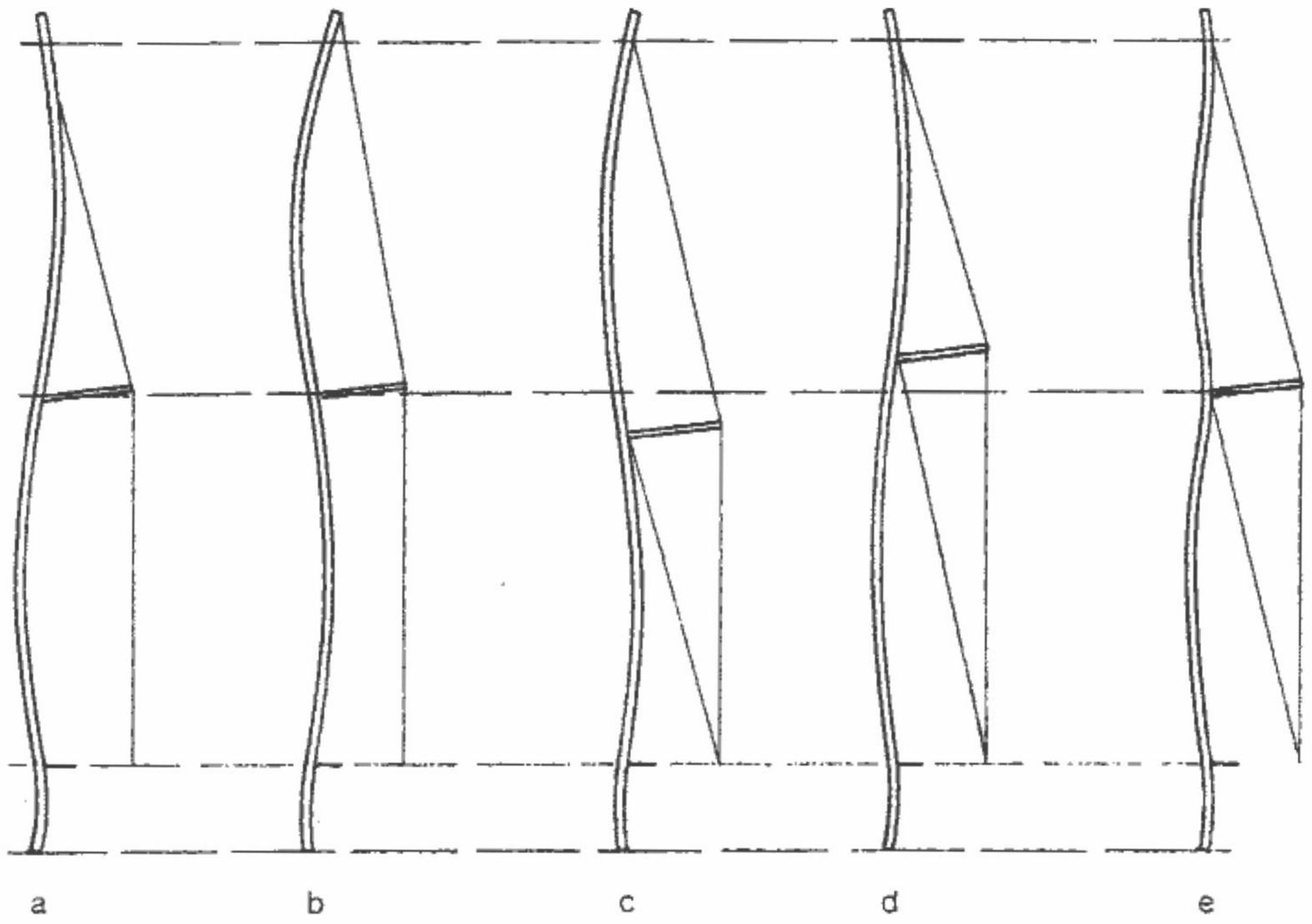


Fig. 6-9 • Déformations (exagérées) du mât selon la position des points d'attache des haubans.
a - galhauban trop bas ; b - galhauban trop haut ; c - bas-hauban trop bas ; d - bas-hauban trop haut ; e - positions correctes.

modifiera bien sûr la répartition et (ou) le sens des forces horizontales au pied du mât. Le fait que le pied du hale-bas soit fixé au mât ou non modifiera également celle-ci.

La FIGURE **6-8** résume l'ensemble des forces latérales perpendiculaires au mât qui induiront dans celui-ci des contraintes de flexion. On voit tout de suite l'importance du positionnement des points d'ancrage des haubans pour obtenir un équilibre correct de celles-ci.

Ainsi, si le point de tire du galhauban n'assure pas l'équilibre entre la traction de l'étai-drisse d'une part et de la partie supérieure de la grand-voile d'autre part, le mât se cintrera au vent si le point est trop bas (FIGURE **6-9 a**) ou sous le vent s'il est trop haut (FIGURE **6-9 b**).

De même, la position du bas-hauban ou des haubans intermédiaires doit assurer l'équilibre des forces de traction de la grand-voile de part et d'autre de son point d'attache. S'il est trop bas, la partie basse viendra au vent (FIGURE **6-9 c**) et, s'il est trop haut, sous le vent (FIGURE **6-9 d**).

Un mât dont le gréement est bien équilibré verra en fait tous ses panneaux se cintrer sous le vent (FIGURE **6-9 e**).

Malheureusement, cet équilibre est tout théorique car les forces agissant sur le mât sont éminemment variables selon les focs qui sont hissés, leur forme, leur réglage, la réduction éventuelle de la grand-voile et, bien sûr, la force du vent, sans parler des variations dynamiques dues aux mouvements du voilier.

Tout ceci n'avait pas trop d'importance tant que les mâts étaient rigides, de forte section et pouvaient être considérés comme des colonnes. Il n'en est plus de même lorsque le cintrage atteint une flèche qui dépasse les dimensions de la section.

e ▪ Le cas des mâts souples

Nous allons voir d'ailleurs en quoi un gréement non en tête (3/4 ou 7/8 par exemple) modifie les équilibres précédents.

Dans le cas le plus simple d'un dériveur léger qui ne comprend en général qu'un étai et un hauban de chaque bord, l'équilibre de la traction de l'étai-drisse est assuré par le hauban et le poids de l'équipier au trapèze qui agiront principalement dans le sens transversal (FIGURE **6-10**) et par la traction de la grand-voile pour le sens longitudinal.

La position du point d'ancrage de l'étai par rapport à la grand-voile aura donc un effet très important sur la flèche du mât dans le sens longitudinal ; plus ce point est bas, plus la flèche sera importante, la pression exercée par la bôme venant encore l'accentuer.

La position du point d'attache du hauban et du trapèze sera définie non seulement par rapport à la grand-voile, mais aussi par rapport au point d'attache de l'étai-drisse.

En effet, si celui-ci est trop bas (pour l'équilibre latéral), on pourra en corriger les effets en remontant les fixations des haubans et trapèze.

La pression de la bôme aura, bien sûr, également une action dans le sens latéral analogue à celle qu'elle a dans le sens longitudinal.

Deux éléments permettront de contrôler le cintrage : l'étambrai (dans les deux directions) et éventuellement la barre de flèche (essentiellement dans le sens transversal).

Une barre de flèche poussante réduira le cintrage au vent alors que, tirante, elle l'augmentera. Elle interviendra dans le contrôle longitudinal dans la mesure où, lorsque le mât se cintre vers l'avant, le montage des deux barres de flèche sera assez rigide pour que, l'ensemble pivotant autour du hauban au vent (FIGURE **6-11a**), l'extrémité de la barre sous le vent vienne prendre appui sur son hauban. Le réglage de l'angle **A** que peuvent prendre les barres de flèche entre elles au moment de cette action, constitue un moyen de contrôle supplémentaire du cintrage longitudinal. Il nécessite cependant une très grande solidité de la fixation de la barre de flèche sur le mât en raison du bras de levier important que représente celle-ci pour la force exercée.

Par ailleurs, si les cadènes de galhaubans sont situées en arrière du pied de mât ou de l'étambrai, ce qui implique des barres de flèche angulées vers l'arrière, le plan dans lequel se place l'effort de compression sur la barre de flèche passe en arrière du mât (FIGURE **6-11 b**). Il en résulte une composante longitudinale qui provoque le cintrage du mât vers l'avant. Comme dans le cas précédent, l'emplanture des barres de flèche doit être capable d'encaisser le moment qui en découle.

Quant à la forme que prendra le mât, elle résultera de l'équilibre entre les tractions de la grand-voile et la réaction au cintrage du mât lui-même.

La répartition des forces de traction de la grand-voile elle-même dépendra des déformations appliquées au tissu du fait de la coupe de la voile et de son réglage, tandis que les réactions du mât seront fonction de l'évolution de sa section dans ses différentes parties.

Le comportement du gréement 3/4 ou 7/8 d'un voilier de course au large sera analogue à celui du dériveur léger si ce n'est que la traction de l'étai-drisse n'est plus équilibrée pour l'essentiel par la grand-voile, mais généralement par une bastaque et que l'on dispose de moyens plus nombreux pour contrôler le cintrage du mât : bas-haubans, pataras, bastaques intermédiaires, guignol (FIGURE **6-12**), les deux derniers ayant une action particulièrement directe sur la forme de ce cintrage, les bastaques contrôlant le cintre entre le capelage de l'étai et le pont, et le guignol celui compris entre la barre de flèche supérieure et la tête.

En plus des contraintes de compression et de flexion que nous venons d'analyser, un mât sera soumis à des contraintes de torsion résultant du fait que les forces de la grand-voile, de la bôme et, généralement, du gréement sont appliquées à la périphérie de sa section. Bien que les moments de torsion qui en résultent soient faibles, ils ne peuvent être ignorés au moins au stade de l'analyse.

B ■ ETUDE DES CONTRAINTES SUR LE MAT

Nous abordons ici le véritable nœud du problème qui nous conduira à appliquer la théorie qui vient d'être échafaudée, à savoir que nous allons partir de la force aérodynamique développée par chaque voile pour analyser son action sur le gréement.

J'avais utilisé autrefois cette méthode pour le calcul de la mâture et du gréement d'origine de *Pen Duick III* dont la géométrie très particulière de la voilure, avec sa misaine à wishbone, ne permettait pas d'utiliser les méthodes de calcul habituelles. Celle exposée ici en est le développement et en montre les limites. Elle implique bien sûr l'estimation de certaines données ou des simplifications, mais peut être facilement ajustée par la simple observation.

Rappelons que le cas étudié est celui de l'allure du près où les efforts sont maximums.

A priori il paraîtrait simple de calculer par les formules habituelles de l'aérodynamique la valeur de ces forces, malheureusement les coefficients de portance et traînée réels sont trop mal connus pour offrir une précision suffisante. Cependant des études basées sur les théories de l'aérodynamique sont menées dans ce sens et sont déjà appliquées au tracé des voiles.

On pourra toutefois utiliser cette méthode lorsque l'on voudra calculer les efforts dus aux voiles plus légères que la voile maxi. Dans ce cas, on pourra prendre pour la force latérale :

$\mathbf{F_y = 0{,}0625 \cdot V^2 \cdot S \cdot C}$ où :

V = vitesse du vent en m/s ;

S = surface de la voile en m^2 ;

C = coefficient de portance variable selon la forme et le creux de la voile, mais que nous estimerons égal à 1,2.

En revanche, nous pouvons déterminer assez bien la part qui, dans la force totale développée par le voilier, revient au foc, à la grand-voile, mais aussi au fardage du gréement et de la coque.

Par ailleurs, nous connaissons également assez bien la valeur de la composante latérale de la force totale puisque son moment par rapport au centre de dérive est à tout instant égal au moment de redressement.

C'est donc à partir du moment de redressement que s'effectuent pratiquement tous les calculs de gréement.

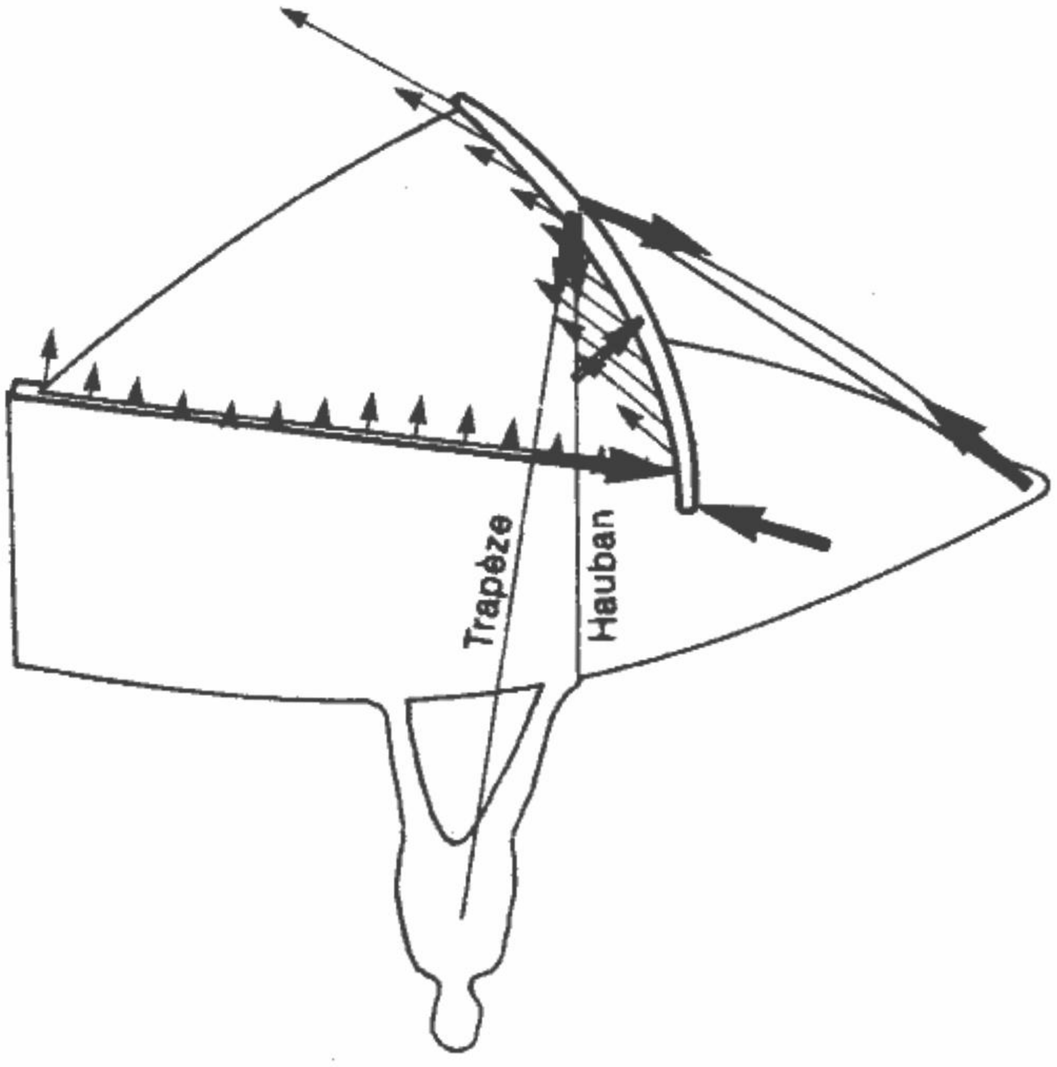


Fig. 6-10 • Sur un dériveur, l'équilibre de la traction de l'étai est presque entièrement assuré par la traction de la grand-voile. La position du capelage des haubans définit donc l'essentiel de l'équilibre du cintrage, celui-ci étant néanmoins contrôlé par la barre de flèche (principalement dans le sens latéral) et, par la pression de la bôme (principalement dans le sens longitudinal). Le hauban et le trapèze se partagent l'équilibre des composantes latérales.

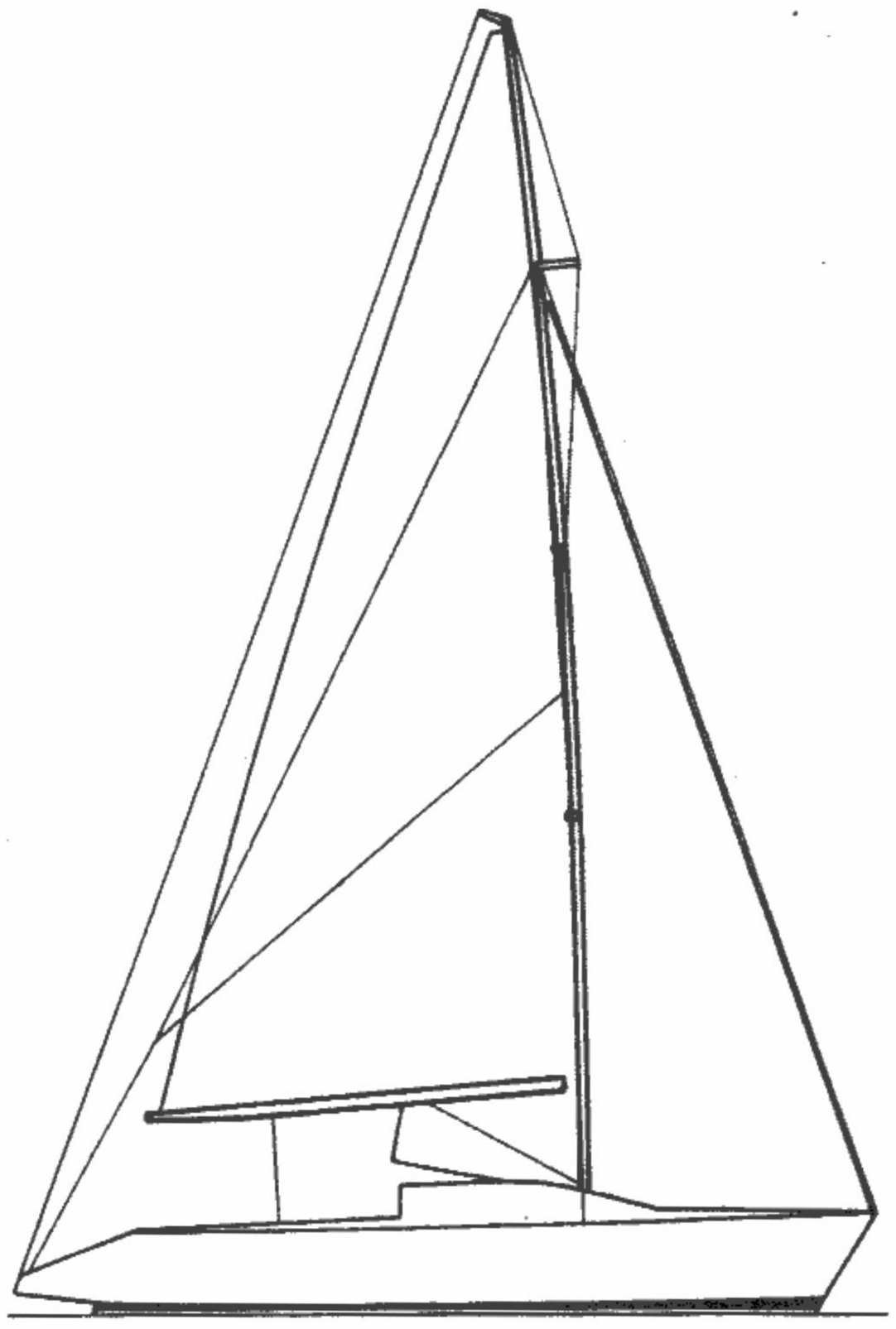


Fig. 6-12 • Dans un gréement fractionné, la grand-voile n'assure plus que partiellement la tenue de l'étai, ce rôle étant surtout rempli par la bastaque. On peut disposer alors de nombreux moyens de contrôler le cintre du mât : dans son ensemble par le pataras, dans sa partie supérieure par le guignol et dans sa partie inférieure par la bastaque intermédiaire.

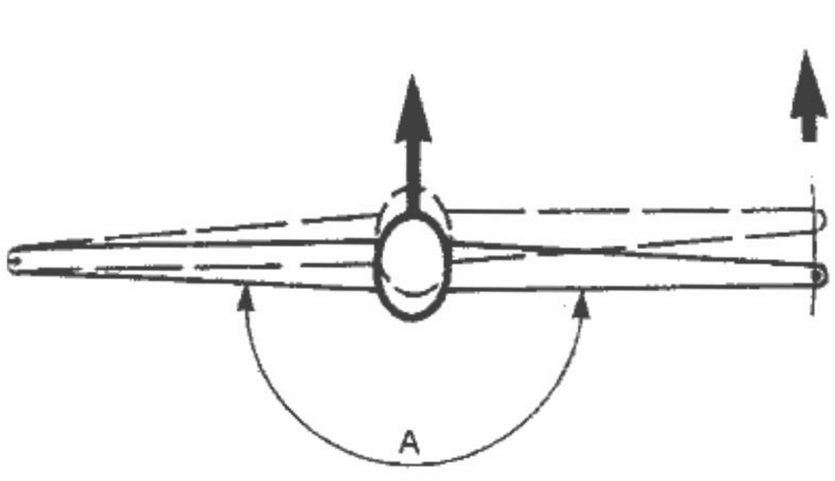


Fig. 6-11 a • Lors de son cintrage, le mât pivote par l'extrémité de sa barre de flèche au vent autour du hauban tendu jusqu'à ce que la barre de flèche sous le vent, entraînant son hauban, tende celui-ci et y prenne appui.

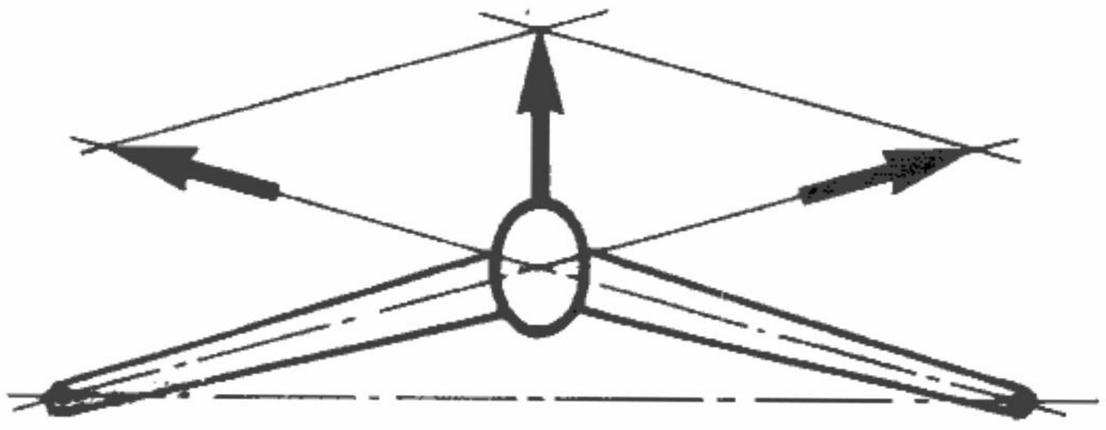


Fig. 6-11 b • La modification de l'angle d'ouverture des barres de flèche **A** permet de régler le cintre en laissant celui-ci se développer plus ou moins avant que le hauban sous le vent n'intervienne.

Le processus consistera donc, à partir d'un moment de redressement que nous choisirons comme significatif des efforts maximums dans le gréement, à déterminer le bras de levier du moment de chavirement et à calculer la force latérale totale correspondante.

La seconde étape nous amènera à définir la part revenant à chacun des éléments du gréement et à en déduire les forces qu'ils exercent en chacun de leur point de liaison avec la mâture et la coque.

1 CHOIX DU MOMENT DE REDRESSEMENT

Toutes les méthodes de calculs de gréement partent de cette donnée, mais toutes ne sont pas d'accord sur la valeur à prendre en considération.

Certains, comme SPARKMAN & STEPHENS, prennent une valeur égale à 1,5 fois le moment de redressement à 30°, d'autres le moment à 45°, d'autres enfin 45 fois le moment à 1°.

En fait, si l'on dispose de la courbe de stabilité, il sera toujours préférable de relever sur celle-ci la valeur maximum; le TABLEAU 6-II montre en effet les disparités qui peuvent se produire avec des formules approchées.

TABLEAU 6/II
COMPARAISON DU MOMENT DE REDRESSEMENT EN mdaN ESTIMÉ SELON LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

	$1{,}5\ Mr_{30}$	Mr_{45}	$45 \times Mr_1$	Mr maxi
Voilier I	2 908	2 495	3 403	3 214
Voilier II	2 143	1 793	2 511	1 852

Le voilier I est un croiseur classique à bau et franc-bord modérés et rapport de lest de 45%. Le voilier II est, lui, un halftonner moderne à bau et franc-bord élevés et faible rapport de lest.

Faute de connaître exactement le moment de redressement maximum, il semble que le moment de redressement à 30° soit le plus proche de la réalité.

Pour une première approximation et pour des voiliers jusqu'à environ 12 m de flottaison et 15 tonnes de déplacement en charge, on pourra l'estimer à :

$$\frac{b^4 \cdot P_e}{0{,}01\ \Delta}$$

où **b** = moyenne des baux maxi et à la flottaison;
P_e = poids du lest;
Δ = déplacement.

Dans tous les cas, les moments de redressement seront établis pour un déplacement à mi-charge.

2 ÉVALUATION DE LA FORCE LATÉRALE

Elle passe d'abord par celle de la hauteur **h** entre les centres de voilure et de dérive. SPARKMAN & STEPHENS estiment le centre de dérive à 40% du tirant d'eau sous la flottaison. Il semble que cette valeur, supérieure à celle correspondant au centre de gravité du plan de dérive, tout au moins pour les voiliers modernes à aileron, soit proche de la réalité si l'on tient compte de la différence de rendement des différents éléments de celui-ci.

D'autre part, l'influence de la coque sur le rendement des voiles, l'orientation moins favorable de leur partie inférieure et le gradient du vent font que le centre de pression sur la voilure est généralement plus élevé que le centre géométrique.

En revanche, la présence de la coque le fait descendre et l'on peut estimer que l'un compense l'autre.

On prendra donc pour bras de levier du moment de chavirement la hauteur du **CV** sur la flottaison plus 40% du tirant d'eau. On aura donc : $\mathbf{F_y\ tot = M_r/h}$

On pourra en déduire la force propulsive F_x sachant que le rapport $\mathbf{F_y\ tot/F_x}$ est environ de 4.

3 RÉPARTITION DES EFFORTS ENTRE LES VOILES

Il faudra d'abord déterminer pour quelle configuration de voilure nous voulons effectuer l'étude. Pour un sloop, ce sera généralement avec le génois lourd maxi et toute la grand-voile. Ce sont des conditions correspondant en général à une navigation par force 3 et mer relativement plate, mais où l'on risque le plus d'être couché par une rafale en portant tout dessus. Par temps plus fort, l'état de la mer conduira généralement à se tenir en deçà de la gîte acceptée précédemment.

Bien sûr, toute autre configuration peut être adoptée pour étudier des cas particuliers. Un exemple typique est celui du sloop couché sous spinnaker après une embardée. La force F_y sera alors presque totalement développée par le spinnaker.

Comme le centre de poussée de cette voile se situe à peu près à mi-hauteur du triangle avant, la traction exercée en tête de mât par la drisse atteindra $\mathbf{F_y/2}$.

Une autre configuration intéressante peut être celle du ketch naviguant sous foc et artimon, sans grand-voile.

Ces conditions définies, il faut déterminer maintenant quelle part revient, dans la force calculée, à l'ensemble coque + gréement et à chacune des voiles.

Selon le fardage de la coque et du gréement, la part de F_y assumée par celui-ci est de 7,5 à 10% soit 90 à 92,5% pour la voilure.

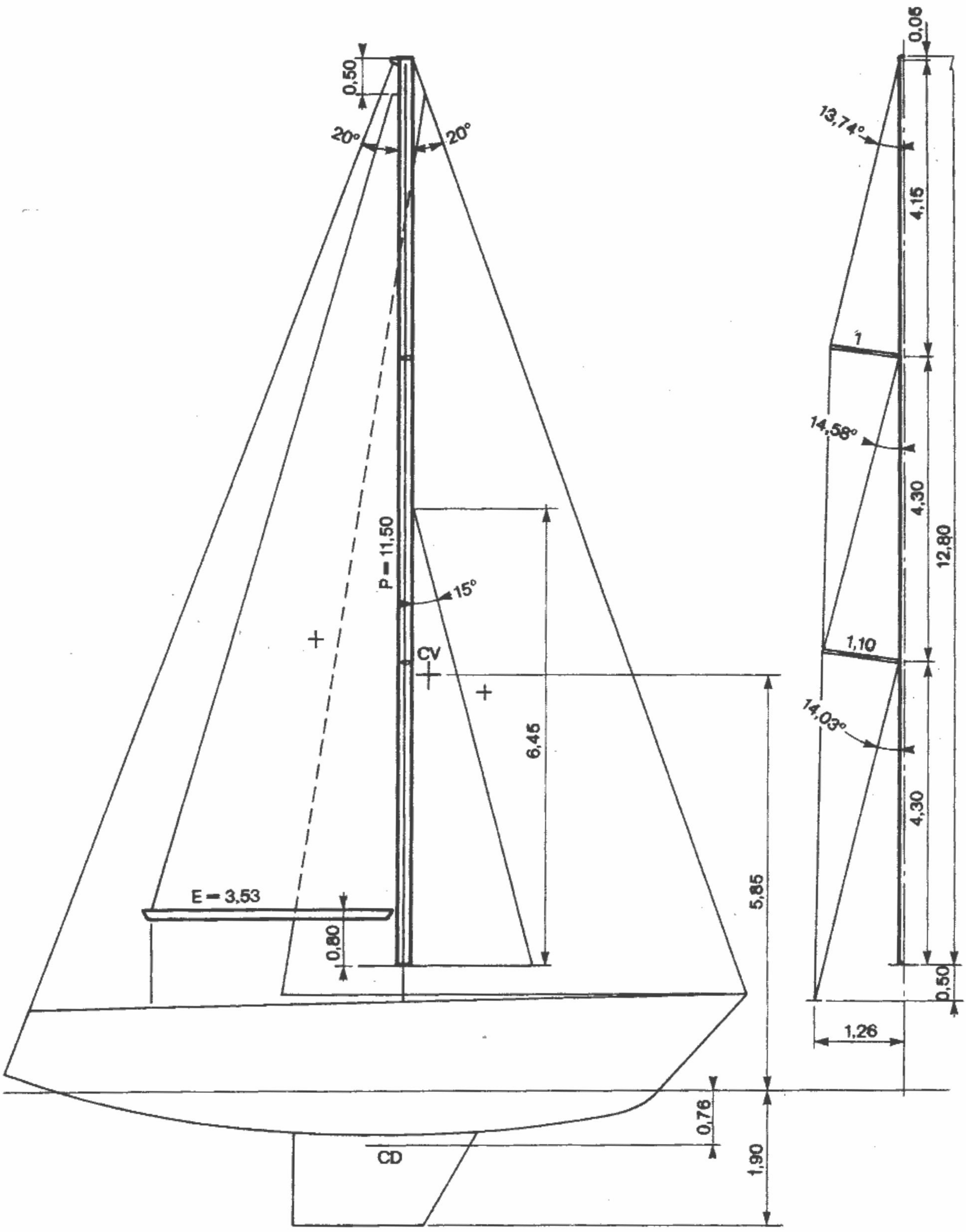


Fig. 6-13 • Plan du gréement de l'exemple développé.

La part revenant au gréement seul (sans la coque) est d'environ 4 %.

Dans le sens longitudinal, le fardage agit négativement, il représente 3,5 à 4 % de F_y, dont 3 % pour le gréement. La force F_x développée par la voilure seule est donc égale à environ 30 % de F_y.

Par convention, nous donnerons à F_x et F_y des valeurs négatives lorsque les forces seront dirigées vers l'arrière ou sous le vent.

La répartition de l'effort entre les voiles dépend du rendement de celles-ci. Dans le sens latéral, la grand-voile fait gîter plus que le foc, on appliquera donc à sa surface un coefficient de 1,05 contre 0,95 pour ce dernier. Un artimon aura un coefficient de 1,1, lorsqu'il est utilisé avec la grand-voile, 1,05 sans celle-ci.

En longitudinal, c'est le contraire, un foc aura un coefficient de 1,2 contre 0,8 pour la grand-voile et 0,5 pour un artimon.

Toutes ces valeurs ne sont pas arbitraires mais reposent sur des essais en soufflerie, en particulier ceux effectués à l'université de Southampton (1). A ce stade, nous allons récapituler par un exemple.

Soit un voilier dont les caractéristiques sont (FIGURE 6-13) :
Moment de redressement à 30° = 3 360 mdaN
Surface grand-voile = 20 m²
Surface génois = 42 m²
Hauteur CV sur flottaison = 5,85 m
Tirant d'eau = 1,90 m
On en tirera :
Moment de redressement maxi : **1,5 x 3 360 = 5 040** mdaN
Bras de levier de chavirement : **5,85 + (0,4 x 1,9) = 6,61** m
• En latéral :
F_y total : **5 040/6,61 = - 762,5** daN dont :
F_y voilure : **762,5 x 0,9 = - 686,25** daN
Surface des voiles pour le calcul :

Grand-voile : **20 x 1,05** =	**21**	m²
Génois : **42 x 0,95** =	**39,9**	m²
Total :	**60,9**	m²

F_y grand-voile : **686,25 x 21/60,9 = - 236,64** daN
F_y génois : **686,25 x 39,9/60,9 = - 449,61** daN
F_y gréement : **762,5 x 0,04 = - 30,5** daN
• En longitudinal * :
F_x voilure : **762,5 x 0,3 = 228,75** daN
Surface des voiles pour le calcul

Grand-voile : **20 x 0,8** =	**16**	m²
Génois : **42 x 1,2** =	**50,4**	m²
Total :	**66,4**	m²

* Ces forces ne sont pas utilisées dans cette partie du calcul mais sont intéressantes à connaître pour d'autres usages.

F_x grand-voile : **228,75 x 16/66,4 = 55,12** daN
F_x génois : **228,75 x 50,4/66,4 = 173,63** daN
F_x gréement : **762,5 x 0,03 = 22,88** daN

4 EFFORTS DES VOILES SUR LA MÂTURE

Maintenant que nous connaissons les efforts développés par chaque voile, nous pouvons déterminer comment ceux-ci vont se répartir sur le gréement dans les sens transversal et longitudinal.

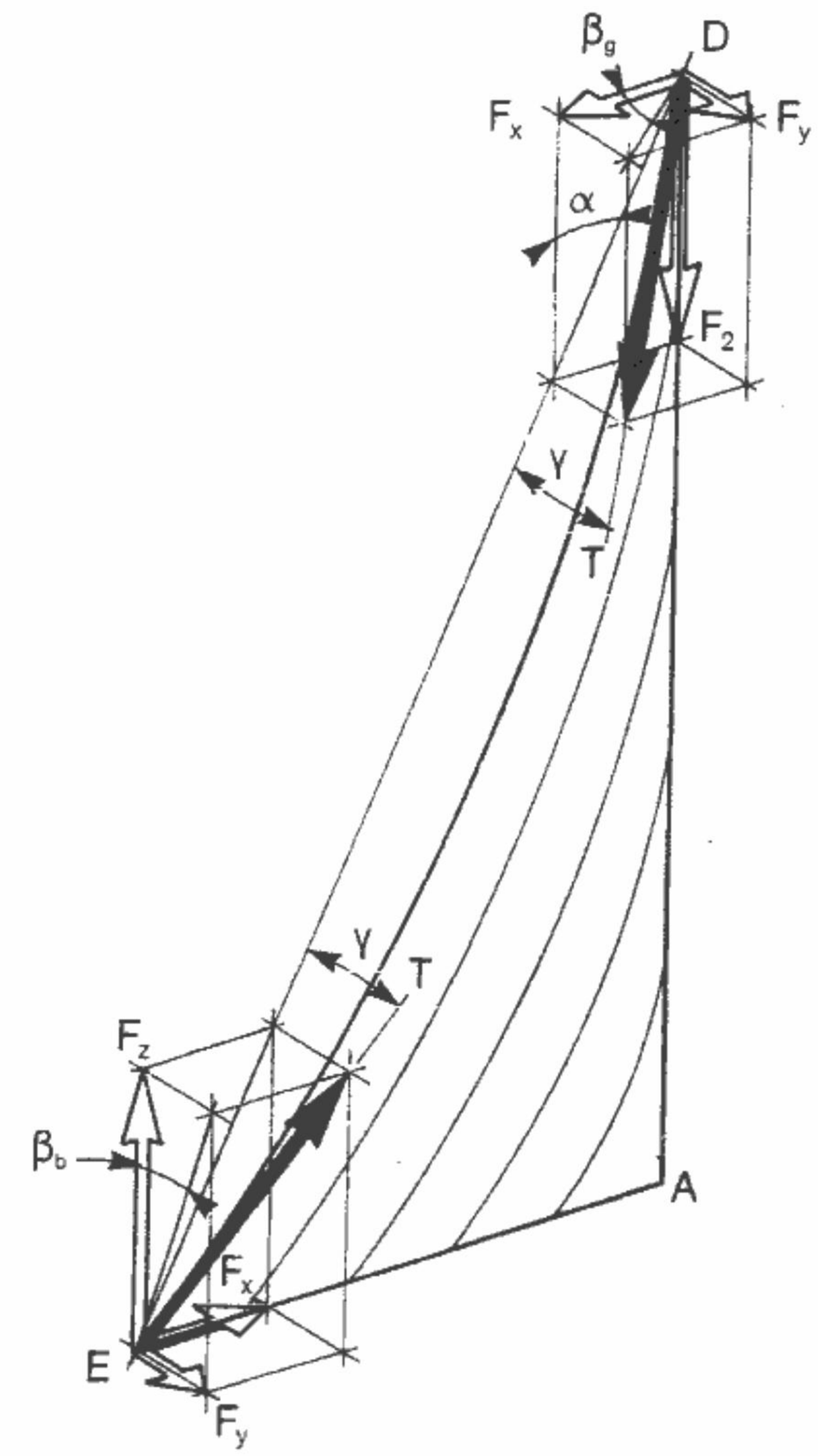


Fig. 6-14 • La grand-voile est assimilée à une série de bandes parallèles à la chute. Connaissant l'angle β_g que fait le guindant de la voile avec le plan de la bôme, il est possible de déterminer les tensions T dans ces bandes.

a • Grand-voile

Faute de pouvoir connaître exactement la répartition des efforts dans la voile, telle qu'elle a été expliquée au début de ce chapitre, nous adopterons la simplification suivante.

Nous considérerons la grand-voile (FIGURE 6-14) comme une juxtaposition de bandes parallèles à la chute et nous supposerons que l'ensemble de la surface est soumis à une pression uniforme.

La courbure que prendra la voile sous l'effet de cette pression sera constante et l'ensemble de la voile constituera une surface conique dont le sommet sera le point d'amure.

Nous connaissons mal la courbure de cette surface et nous considérerons, dans un premier temps, qu'elle est un arc de cercle. En revanche, il est relativement facile d'observer l'angle β_g que fait la partie de la voile proche du guindant, il dépend de la coupe et du réglage de la voile et est généralement compris entre 30 et 40° par rapport au plan passant par la bôme et le mât.

C'est ce plan que nous prendrons pour référence pour l'instant.

Du fait de sa souplesse, le tissu s'aligne obligatoirement avec la force de traction qu'il transmet. La direction de celle-ci est donc donnée par la tangente à la voile au point où elle rencontre l'espar.

L'angle γ qui en résulte est donné par la formule :

$\tan \gamma = \tan \alpha \tan \beta_b \cos \alpha$ où $\tan \alpha = E/P$ *

Reprenant la formule de la flèche du câble, on aura pour tension totale entre mât et bôme :

$T = F_{yg\text{-}v}/2 \sin \gamma$

Ce qui nous donnera :

- Effort transversal sur le mât et la bôme :

$P_y = T \sin \gamma = F_{yg\text{-}v}/2$

- Effort longitudinal sur le mât et compression sur la bôme :

$$P_{xm} = P_{xb} = T \cos \gamma \sin \alpha = \frac{F_{yg\ -v} \cos \gamma \sin \alpha}{2 \sin \gamma}$$

- Effort de compression sur le mât et vertical sur la bôme :

$$P_{zm} = P_{zb} = T \cos \gamma \cos \alpha = \frac{F_{vg\text{-}v} \cos \gamma \cos \alpha}{2 \sin \gamma}$$

Voyons ce que cela donnera pour notre exemple en prenant $\beta_g = 40°$, $P = 11{,}50$ m, $E = 3{,}53$ m, d'où $\alpha = 17{,}07°$:

$\tan \gamma = \tan 17{,}07° \times \tan 40° \times \cos 17{,}07° = 0{,}246$

$\gamma = 13{,}84°$

$P_y = - 236{,}64/2 = - 118{,}32$ daN

$P_{xb} = - P_{xm} = (236{,}64 \cos 13{,}84° \sin 17{,}07°)/2 \sin 13{,}84° = 141$ daN

$P_{zb} = - P_{zm} = (236{,}64 \cos 13{,}84° \cos 17{,}07°)/2 \sin 13{,}84° = 458{,}74$ daN

* P étant la longueur du guindant et E celle de la bordure (symboles de la jauge IOR).

Faute de connaître exactement la répartition de ces forces sur le mât et la bôme, nous adopterons une répartition triangulaire avec un maximum aux points de drisse et d'écoute et zéro au point d'amure. C'est celle qui sera la plus proche de la réalité, tout au moins pour le mât car, pour la bôme, la coupe de la partie basse de la voile peut conduire parfois à s'approcher de la voile à bordure libre où tout l'effort est concentré sur le point d'écoute.

b • Bôme

Nous supposerons que l'écoute est attachée à la hauteur du point d'écoute de la voile et que le hale-bas n'est pas étarqué. Lorsque l'écoute n'est pas attachée à hauteur du point d'écoute, les efforts à son niveau seront dans le rapport **E/x** de ceux calculés au point d'écoute, **x** étant sa distance au point d'amure.

La résultante des efforts verticaux et transversaux se situant au tiers de la bôme à partir du point d'écoute, on aura les deux tiers des efforts sur le point d'écoute et un tiers sur le point d'amure (FIGURE 6-15) soit :

- au point d'écoute : $p_{ye} = - 118{,}32 \times 2/3 = - 78{,}9$ daN *

$p_{ze} = 458{,}74 \times 2/3 = 305{,}8$ daN

* On peut aussi considérer la grand-voile comme une surface triangulaire articulée sur le guindant. Son centre de gravité étant situé au tiers de la bordure on aura au point d'écoute $p_{ye} = F_y/3 = - 236{,}64/3 = - 78{,}9$ daN, résultat identique.

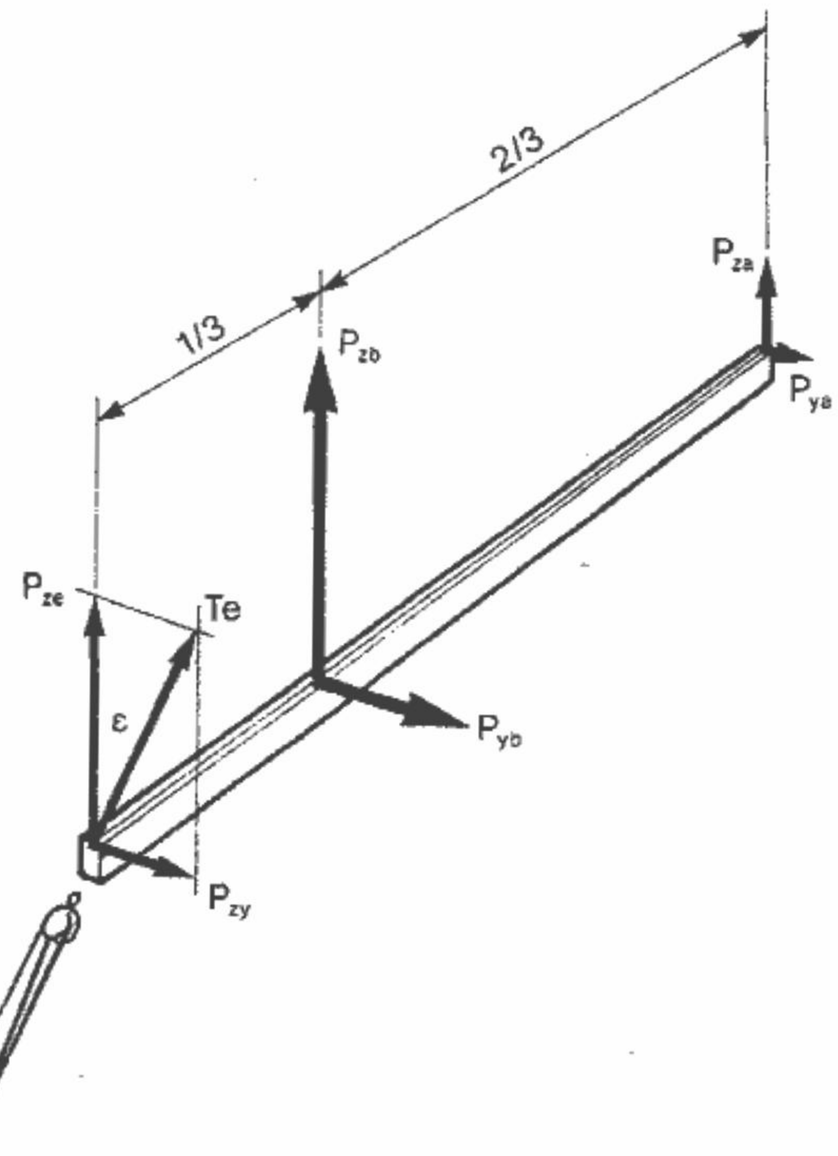


Fig. 6-15 • Les efforts sur la bôme.

La tension dans l'écoute sera égale à :
$\mathbf{T_e = \sqrt{78{,}9^2 + 305{,}8^2} = 315{,}8}$ daN
L'angle de l'écoute correspondant est donné par :
$\mathbf{\tan \epsilon = 78{,}9/305{,}8}$ d'où $\mathbf{\epsilon = 14{,}46°}$

Cet angle est plus fort que celui que l'on peut observer dans la réalité et qui se situe autour de 10°.

Il résulte du fait que nous avons choisi pour la courbure de la voile un arc de cercle, alors qu'en réalité la courbe est plus plate sur l'arrière. La force latérale restant constante, c'est la force verticale et la traction dans l'écoute qui vont s'accroître. Si l'on prend $\epsilon = 10°$ on aura :
- au point d'écoute :
$\mathbf{T_e = p_{ye}/\sin 10° = 78{,}9/\sin 10° = 454{,}2}$ daN
$\mathbf{p_{ze} = p_{ye}/\tan 10° = 447{,}3}$ daN
- au point d'amure :
$\mathbf{p_{ya} = - p_{ye}/2 = - 78{,}9/2 = - 39{,}4}$ daN
$\mathbf{p_{za} = p_{ze}/2 = 223{,}7}$ daN

Quant à la traction dans la drisse, elle sera égale à :
$\mathbf{P_{zb} = p_{ze} + p_{za} = 447{,}3 + 223{,}7 = 671}$ daN
Ces modifications de la traction sur la bôme se répercuteront bien sûr sur le mât puisque
$\mathbf{P_{zm} = P_{zb} = - 671}$ daN, on aura donc
$\mathbf{P_{xm} = - 671 \tan \alpha = - 206}$ daN
et $\mathbf{P_{xb} = 206}$ daN

On constate alors que, pour le cas général étudié ici, la traction sur la bôme $\mathbf{P_{zb} = - 671}$ daN est sensiblement égale à $\mathbf{3\ F_{yg\text{-}v} \cos \alpha = 678{,}5}$ daN et $\mathbf{P_{xb} \approx 3\ F_{yg\text{-}v} \sin \alpha = 194{,}5}$ daN

Nous partirons de ces valeurs pour le calcul de la bôme.

Attention, la pression $\mathbf{P_{xb}}$ exercée par la bôme sur le mât peut être beaucoup plus élevée lorsque le hale-bas est étarqué. Il soulage alors l'effort vertical sur l'écoute mais, compte tenu de la position avancée de son point d'attache sur la bôme et de son angle de tire, la compression qu'il

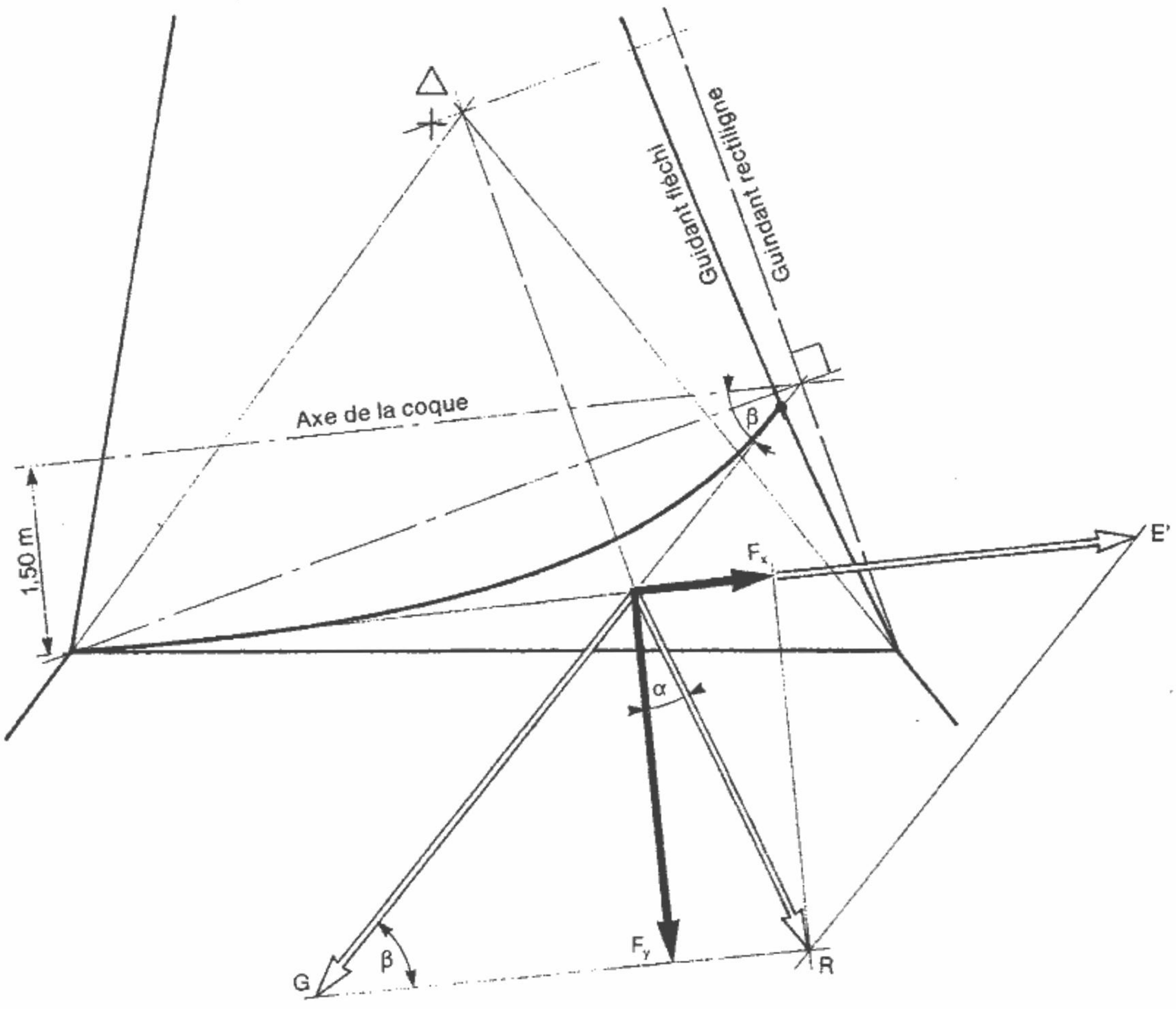


Fig. 6-16 • Décomposition de la résultante du foc selon les directions perpendiculaires au guindant dans le plan de celui-ci et dans le plan de l'écoute.

induit est importante et modifie l'équilibre entre les panneaux du mât, moyen bien connu de réglage de la courbure de celui-ci.

Jusqu'ici, nous avions pris pour référence le plan passant par le mât et la bôme, il nous faut maintenant ramener ce plan dans l'axe du voilier.

Nous prendrons pour l'angle de la bôme une valeur de 5°. Le problème est rapidement résolu en passant par la conversion polaire/rectangulaire d'une calculatrice. Les valeurs corrigées s'établiront ainsi :

P_{xm} = **- 206 → - 194,9**

P_{ym} = **- 118,32 → - 135,8**

La compression de la bôme $\mathbf{p_{xb}}$ se décomposera au point d'amure en :

p'_{xa} = **206 cos 5° = 205,2** daN

p'_{ya} = **206 sin 5° = 18** daN

L'effort latéral au point d'amure $\mathbf{p_{ya}}$ se décomposera en

p''_{xa} = **39,4 sin 5° = 3,4** daN

p''_{ya} = **- 39,4 cos 5° = - 39,3** daN

Soit au total :

p_{xa} = **205,2 + 3,4 = 208,6** daN

p_{ya} = **18 - 39,3 = - 21,3** daN

c ▪ Génois

Sur le bateau qui nous sert d'exemple, le point de tire de l'écoute de foc se situe à 1,50 m de l'axe.

Par observation, nous savons que l'écoute sort dans un plan sensiblement parallèle au plan axial du voilier et que l'angle d'attaque du génois **ß** est d'environ 45°. Enfin nous admettrons pour le guindant une flèche, prévue par le voilier, de 0,43 m soit, dans notre exemple, 3,18 % et un creux de 10 %. Nous pouvons donc tracer une section perpendiculaire à l'étai et passant par le point d'écoute (FIGURE **6-16**).

La résultante de $\mathbf{F_y}$ et $\mathbf{F_x}$ passe par l'intersection des deux plans tangents au guindant et au point d'écoute. Cette intersection est donc un lieu du point de convergence des trois forces équilibrant la résultante. Celle-ci coupe la droite joignant le point d'écoute à l'étai aux 3/10 de celle-ci, soit un peu en avant du tiers, ce qui est normal.

On notera également qu'elle se situe un peu en avant de la perpendiculaire à cette droite, ce qui est également normal si l'on tient compte d'un certain dévers de la voile sur l'ensemble de sa hauteur.

En décomposant la résultante selon les deux plans tangents, nous aurons la traction dans le plan de l'écoute **E'** et la traction **G** répartie sur le guindant.

$\mathbf{E' = F_y}$ **(sin** α **+ tan ß) = 449,61 (sin 19,95°+ tan 45°) = 603** daN

$\mathbf{G = F_y/sin\ ß = 449,61 \sin 45° = 636}$ daN

Nous pouvons maintenant tracer une projection latérale du génois sur laquelle nous porterons la position du point de convergence des forces (FIGURE **6-17**). Nous le placerons à la même hauteur que le centre de voilure géométrique et sur la droite parallèle au guindant vue précédemment.

A partir de ce point, nous avons la direction des trois forces **A**, **D** et **E** passant respectivement par les trois points d'amure, de drisse et d'écoute.

A partir de **E'**, projection de **E** sur la perpendiculaire au guindant, nous obtenons **E = 709,46** daN, c'est la traction dans l'écoute.

Par composition de **E** et $\mathbf{F_X}$ et décomposition de leur résultante, nous obtenons les projections sur le plan axial de **D** et **A**.

Un rabattement sur un plan transversal nous donnera, à partir de $\mathbf{F_y}$, la projection des trois forces sur ce plan. Nous pouvons mesurer ou calculer leur valeur en vraie grandeur et leurs angles dans les plans longitudinaux et transversaux.

Pour notre exemple, on trouvera ainsi :

A = 812 daN

D = 1 226 daN

α = **9,94°**

γ = **10,06°**

On constate, au vu de ces angles, l'importance qu'il y a à munir les points d'attache haut et bas de l'étai et le point d'amure d'une articulation à grand débattement et de dessiner correctement la sortie de drisse pour que celle-ci ne ragues pas sur les bords de la cage du réa.

Jusqu'ici, nous avons raisonné comme si le génois n'était pas endraillé sur un étai.

La présence de celui-ci et sa tension propre vont équilibrer une partie des forces normales au guindant et alléger d'autant leur composante dans la traction de la drisse.

Il est très difficile de définir exactement cette proportion d'autant qu'elle est éminemment variable puisqu'elle est liée à la coupe et au réglage de la voile et du gréement.

La répartition le long du guindant est également mal connue. Nous estimerons, un peu arbitrairement je le reconnais, que la force sur le guindant **G** sera répartie pour 2/3 sur l'étai et 1/3 sur le guindant. La tension dans l'étai qui en résulte sera alors : $\mathbf{T = G/12\ c}$ où **c** est la courbure exprimée par le rapport flèche/guindant.

Dans notre exemple :

T = 636 x 100/12 x 3,18 = 1 667 daN

L'allégement de la tension dans la drisse, qui n'intervient que sur la part de celle-ci correspondant à la tension du guindant, sera estimé au 1/4 de celle-ci. On aura donc :

D = 1 226 x 0,75 = 919,5 daN

La somme des deux tensions déterminera les efforts globaux au capelage de l'étai sur le mât et sur la ferrure d'étrave.

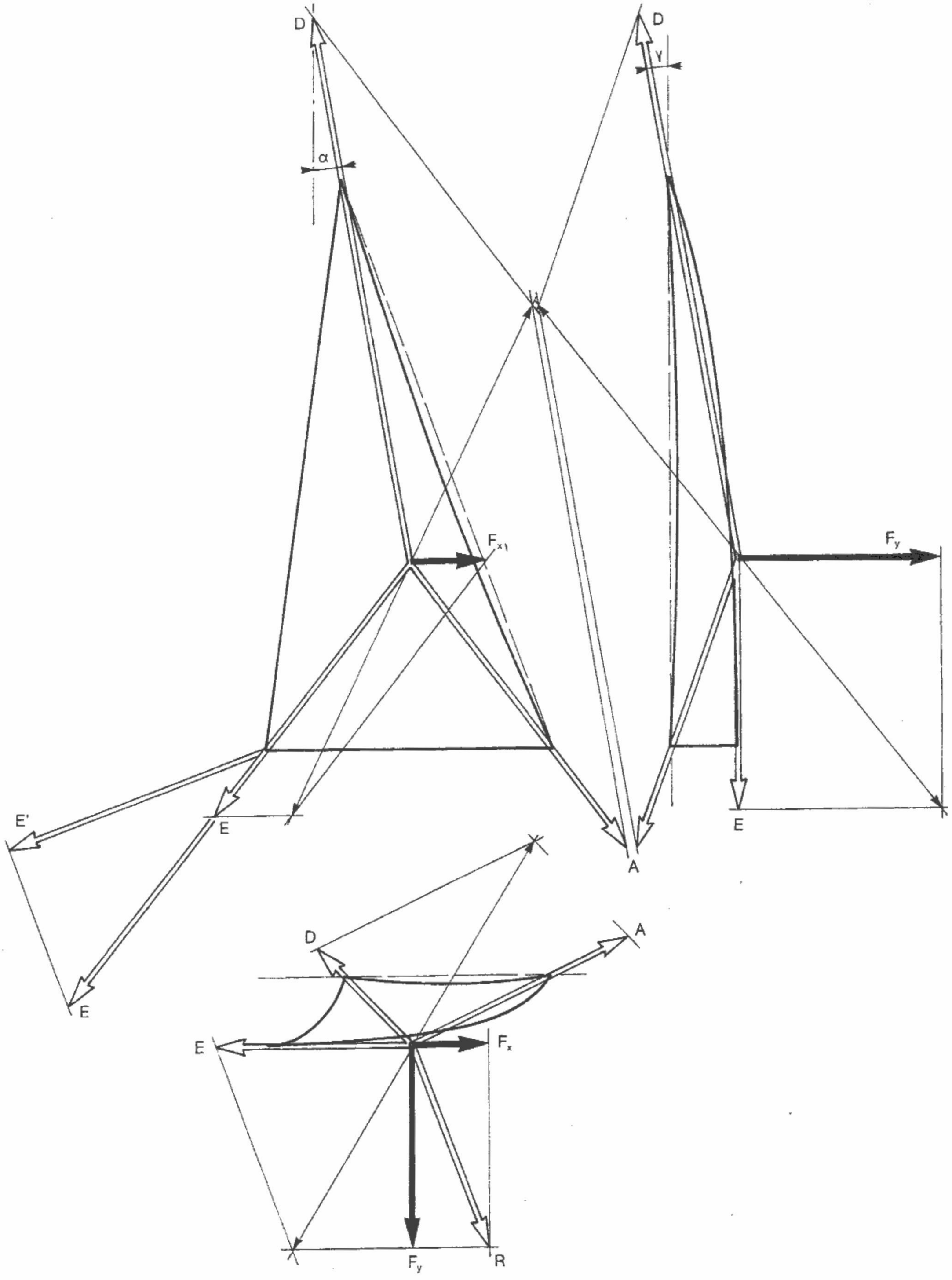


Fig. 6-17 • Décomposition de la résultante du foc selon les trois axes de la drisse **D**, de l'écoute **E** et de l'amure **A**.

En tête de mât, nous aurons alors :
Drisse + étai = **919,5 + 1 667 = 2 586,5** daN
qui se décomposera en :
Compression sur le mât

$$F_Z = \sqrt{\frac{2\,586^2}{\sin^2\gamma + 1/\cos^2\alpha}} = -\,2\,511 \text{ daN}$$

Force latérale $F_Y = 2\,511 \sin\gamma = -\,438{,}5$ daN
Force longitudinale $F_X = 2\,511 \sin\alpha = 433{,}5$ daN

d ▪ Répartition de l'effort des voiles sur la mâture

Nous pouvons maintenant représenter la répartition (que nous avons admise triangulaire) des efforts de la grand-voile sur le mât dans les plans longitudinal et transversal (FIGURES 6-18 A et B) en considérant, ainsi que pour toute la suite des calculs, que le mât reste droit. Pour une répartition triangulaire de la charge de la grand-voile, la valeur de la traction exercée par unité de longueur, au niveau du point de drisse est égale à **2F/P** soit :
en longitudinal : $p_X = 2 \times 194{,}9/11{,}5 = 33{,}90$ daN/m
en transversal : $p_Y = 2 \times 135{,}8/11{,}5 = 23{,}62$ daN/m

A partir de l'emplacement des points d'attache, nous pouvons établir un premier tableau des efforts qui y sont exercés :

	Longitudinal	Transversal
Tête de mât	433,5 - 75,86 = 357,64	
Bas étai	- 79,43	
Galhauban supérieur		- 470,93
2ème barre de flèche		- 69,00
1ère barre de flèche		- 36,05
Pied de mât	168,98	- 25,72
	447,19	- 601,70

Si le mât était constitué d'éléments articulés à chaque point de fixation, ce sont ces efforts qui s'exerceraient sur les

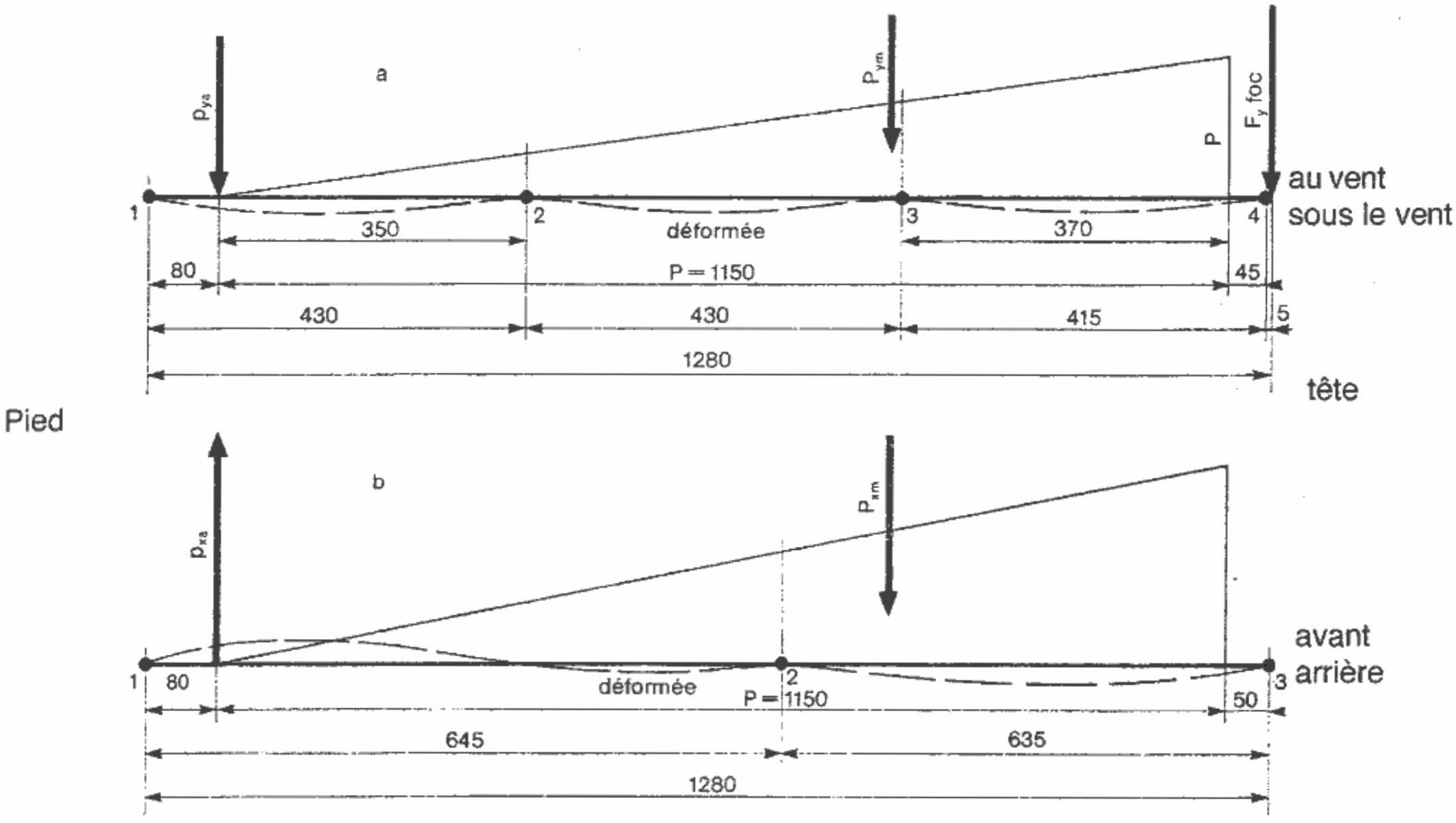


Fig. 6-18 • Géométrie du mât dans le sens transversal (a) et longitudinal (b).

haubans. Mais, en réalité, le mât est un profil continu. A chaque nœud vont se créer des moments de flexion égaux et de sens opposé qui vont modifier la charge qui s'y exerce. Le calcul, qui peut être résolu par le « théorème des trois moments » est extrêmement complexe et je ne le développerai pas ici.

Pour notre exemple, on aboutit au tableau corrigé :

	Longitudinal	Transversal
Tête de mât	362,54	
Bas étai	- 89,16	
Galhauban		- 464,14
supérieur		- 77,98
2ème barre de flèche		- 43,32
1ère barre de flèche	173,81	- 16,26
Pied de mât	447,19	- 601,70

Dans le cas d'un mât emplanté sur la quille, les résultats seraient un peu différents du fait de la présence d'un tronçon supplémentaire entre le pont et le pied de mât.

Encore une fois, je tiens à préciser que ces calculs sont approchés et destinés essentiellement à décrire le fonctionnement mécanique de la mâture et de son gréement. En particulier, dans l'application du théorème des trois moments, je n'ai pas tenu compte du déplacement des points d'ancrage des haubans dû à leur allongement.

5 TRACTION DANS LES HAUBANS

Connaissant la charge en chaque point, nous allons pouvoir calculer celles des haubans et la compression qu'elles induiront dans le mât.

a ▪ Haubanage longitudinal (FIGURE 6-19)

La charge en tête sera équilibrée par la traction du pataras :
$\mathbf{T = F_X / \sin \alpha}$ induisant une compression dans le mât :
$\mathbf{F_Z = F_X / \tan \alpha}$
Les mêmes formules s'appliqueront aux bastaques et aux étais intermédiaires.

b ▪ Haubanage transversal (FIGURE 6-20)

Les barres de flèche sont calées selon la bissectrice de l'angle que fait le hauban à leur passage.

Lorsque le hauban redescend parallèlement au mât, son angle de tire est :
$\alpha = 2 \sin^{-1} f/2l$, avec **f** : longueur de la barre de flèche.
Dans ce cas, l'angle de la barre de flèche $\beta = \alpha/2$
La compression induite dans le mât est : $\mathbf{F_Z = F_Y / \tan \alpha}$
et la traction dans le hauban : $\mathbf{T = F_Y / \sin \alpha}$
Au niveau de la barre de flèche, on a :
- Compression dans la barre de flèche :

$$\mathbf{c = \frac{2\,F_Y \sin \alpha/2}{\sin \alpha}}$$

- Composante latérale sur le mât : $\mathbf{f_Y = F_Y}$
- Composante verticale sur le mât :

$$\mathbf{f_Z = \frac{2\,F_Y \sin^2 \alpha/2}{\sin \alpha}}$$

Lorsque le hauban ne redescend pas parallèlement au mât (cas de barres de flèche de longueur progressivement réduite) mais fait avec la verticale un angle γ, l'angle α ne change pratiquement pas. Celui de la barre est augmenté de $\gamma/2$.
On a alors au niveau de la barre de flèche :

$$\mathbf{c = \frac{2\,F_Y}{\sin \alpha} \cdot \sin\left(\frac{\alpha - \gamma}{2}\right)}$$

$$\mathbf{f_Y = \frac{F_Y (\sin \alpha - \sin \gamma)}{\sin \alpha}}$$

$$\mathbf{f_Z = \frac{F_Y (\cos \alpha - \cos \gamma)}{\sin \alpha}}$$

L'influence de l'angle γ est très grande et peut entraîner des réductions importantes de **c** et $\mathbf{F_Y}$ avec un transfert correspondant de la charge dans le hauban supérieur lorsqu'on réduit progressivement la longueur des barres de flèche des étages inférieurs vers les étages supérieurs.

Pour les haubans dans le plan du mât, les formules sont les mêmes que pour le pataras. Dans le cas de bas-haubans double, celui de l'avant supportera la charge transversale, mais aussi la charge longitudinale réservée précédemment au bas-étai. Il aura donc une double composante verticale et sa traction sera accrue de la résultante de la charge longitudinale.

La résultante de la charge transversale sera répartie également entre les deux bas-haubans et augmentée en tenant compte de leur angle γ sur l'avant et l'arrière.

On aura ainsi pour le bas-hauban arrière :
$\mathbf{T_{AR} = F_Y/2 \sin \alpha \cos \gamma}$
et pour le bas-hauban avant :
$\mathbf{T_{AV} = F_Y/2 \sin \alpha \cos \gamma + F_X / \sin \gamma}$

Nous allons pouvoir maintenant établir un tableau (PAGE 98) permettant de définir toutes les composantes de compression dans le mât et de traction dans les haubans.

La compression dans les trois panneaux du mât se répartira donc comme suit :
- Panneau supérieur :
- 2 511 - 919,5 - 2 x 671 - 996 - 1 898 = - 7 666,5 daN

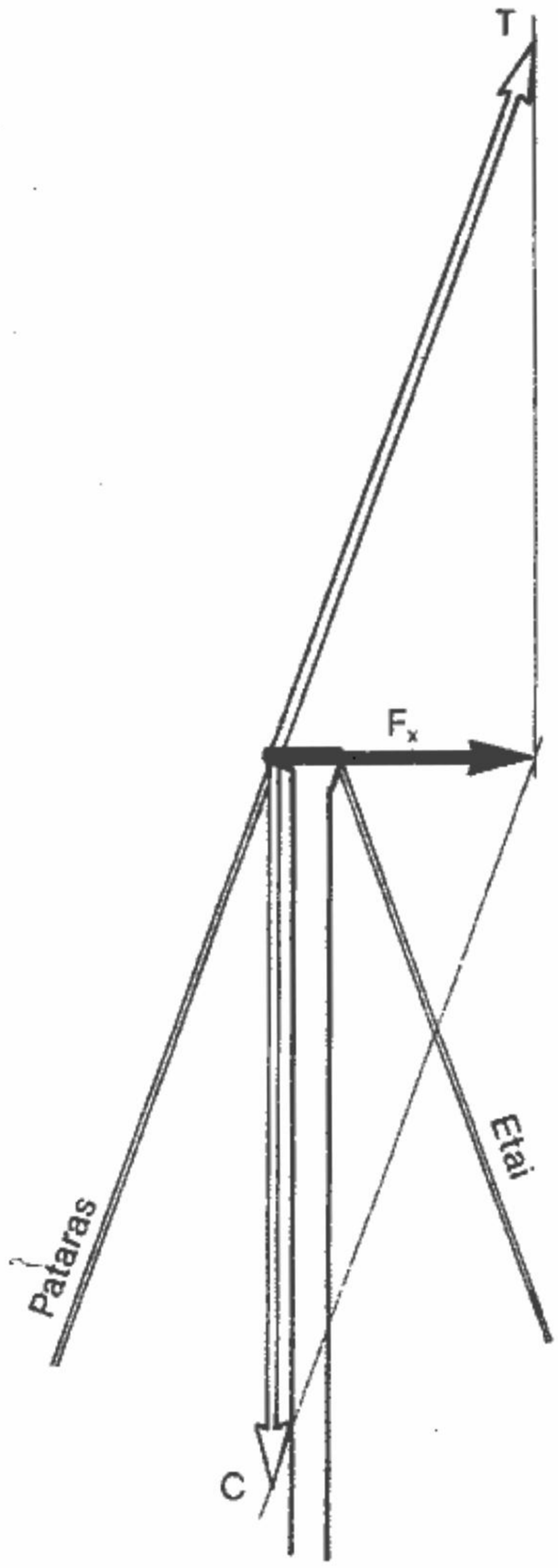


Fig. 6-19 • La traction en tête de mât F_X engendre une tension dans le pataras **T** et une compression dans le mât **C**. Selon leur distance à l'axe du mât, les compressions dues à l'étai et au pataras peuvent engendrer un moment fléchissant dans la partie haute.

- Panneau intermédiaire :
- **7 666,5** - **55** - **1 848,2** = **- 9 569,7** daN au-dessus du bas-étai
- Panneau intermédiaire :
- **9 569,7** - **332,9** = **- 9 902,6** daN au-dessous du bas étai
- Panneau inférieur :
- **9 902,6** - **60,8** - **1 895,6** = **- 11 859** daN

6 COEFFICIENTS DE SÉCURITÉ

Jusqu'ici nous n'avons considéré que les efforts statiques. Il est bien évident qu'en plus des habituels coefficients destinés à tenir compte des tolérances des caractéristiques

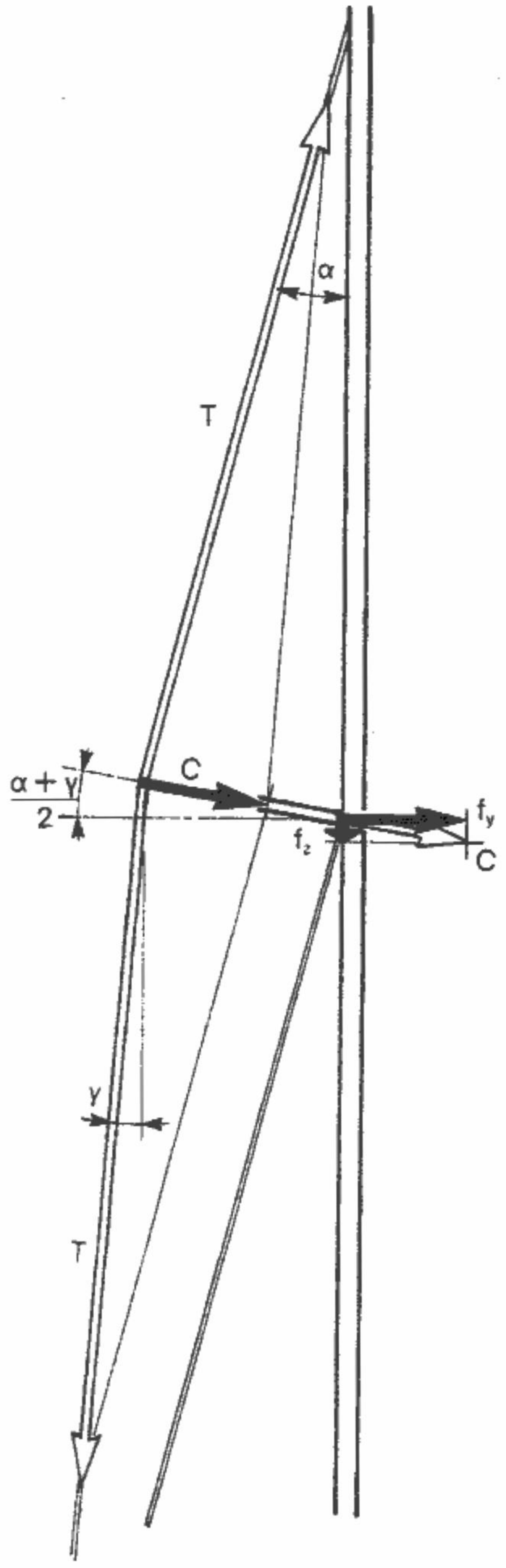


Fig. 6-20 • La tension du galhauban transmet au mât, par l'intermédiaire de la barre de flèche, une force **C** qui se décompose en une compression f_z et une force transversale f_y. La valeur de **C** varie très vite lorsqu'on modifie l'angle γ.

mécaniques, les efforts sur le haubanage et le mât vont subir des variations importantes dues aux efforts dynamiques du mouvement du voilier.

Lors d'études effectuées en Suède, à l'École Technique Supérieure Chalmers de Malmoe, on a mesuré les variations suivantes par rapport aux charges moyennes. Le voilier utili-

sé, un L-32, mesurait 9,81 m H.T., déplaçait 4,6 t. La voilure de sloop de 47,85 m² était soutenue par un gréement en tête avec un étage de barres de flèche et une paire de bas-haubans de chaque bord.

Tension des haubans	Étai	+ 32 %
	Galhauban	+ 45 %
	Bas-hauban arrière	+ 71 %
	Bas-hauban avant	+ 42 %
Contraintes dans le mât	Panneau supérieur	+ 133 %
	Panneau inférieur	+ 34 %

On notera les variations importantes de la tension du bas-hauban arrière et de la contrainte dans le panneau supérieur du mât. Elles s'expliquent très bien par le fait que les décélérations sont beaucoup plus élevées que les accélérations ; le mât a alors tendance à faire ventre vers l'avant, d'où une surcharge importante du bas-hauban arrière et une décharge du bas-hauban avant.

Quant au panneau supérieur du mât, étant plus loin du centre de gravité, il est soumis à des décélérations plus élevées, alors même que, la partie haute de la voile faseyant, il n'est plus soutenu par celle-ci.

Néanmoins, la somme des variations mesurées dans l'étai et le galhauban paraissent faibles par rapport à celles de la partie supérieure du mât, et je pense que la réalité doit être plus proche de leur moyenne. Il faut noter, par ailleurs, que les accélérations auxquelles est soumis le gréement varient comme le carré de la vitesse. On imagine quelles peuvent être les conséquences pour un multicoque naviguant à 30 nœuds.

Globalement, en incluant les facteurs mécaniques, dynamiques et de fatigue, on pourra adopter les coefficients de sécurité du tableau ci-contre pour un monocoque. Pour les multicoques, les coefficients du gréement longitudinal pourraient être doublés.

La fourchette indiquée tient compte des conditions d'utilisation. La valeur la plus faible correspond à des petits voiliers de croisière côtière, la plus élevée à des grands voiliers hauturiers.

On notera que les coefficients sont plus faibles pour un bas-hauban unique dans le plan, peu sollicité par les décélérations, que pour un bas-hauban décalé vers l'arrière qui, lui, en supporte tous les effets.

Si nous appliquons ces coefficients aux charges dans les haubans calculés ci-dessus, nous trouverons respectivement :

Étai :	1 667	x 3,5	=	5 834	daN
Bas étai :	344,6	x 2,4	=	827	daN
Galh. sup. :	1 954	x 2,1	=	4 103,4	daN
Galh. inter. :	1 909,7	x 2,1	=	4 010,4	daN
Bas-hauban :	1 954	x 2,4	=	4 689,6	daN

POINT DU GRÉEMENT	EFFORT SUR L'ÉLÉMENT INTÉRESSÉ *		EFFORTS DUR LE MÂT* Gréement longitudinal F_x	Gréement longitudinal F_z	Gréement transversal F_y	Gréement transversal F_z
Tête de mât	Étai	1667	} 362,5	- 2511		
	Drisse de foc	919,5				
	Ret. dris. foc			- 919,5		
	Drisse de G.V.	671		- 671		
	Ret. dris. G.V.			- 671		
	Pataras	*1059,9*		*- 996*		
	Galhauban sup.	*1954*			- 464,1	*- 1898*
2ème barre de flèche	Barre de flèche	*406,5*			*- 402,7*	*- 55*
	Galh. inter.	*1909,7*			- 56,37 *- 402,7*	*- 1848,2*
Bas étai	Bas étai	*344,6*	- 89,2	*- 332,9*		
1ère barre de flèche	Barre de flèche	*435*			*- 430,7*	*- 60,8*
	Bas hauban	*1954*			- 28,98 *- 430,7*	*- 1895,6*
Vit de mulet			208,6		- 27,4	
				- 6101,4		*- 5757,6*

* Les chiffres en romain résultent des calculs précédents, ceux en italique sont dus à la charge du haubanage qui en résulte. Pour ne pas trop compliquer la démonstration, il n'est pas tenu compte du fardage du mât et du gréement, de toute façon faible. Par ailleurs, lorsque le mât atteint une certaine taille, son poids propre ne peut être négligé.

	1 étage de barres de flèche	2 étages de barres de flèche
Étai, pataras, bastaques des gréements 7/8	3-3,5	
Bas étai	2,2 - 2,4	
Galhaubans	2 - 2,2	1,9 - 2,1
Bas-haubans uniques dans le plan	2,1 - 2,3	2,2 - 2,4
Bas-haubans avant	1,8 - 2	1,9 - 2,1
Bas-haubans arrière, bastaques intermédiaires	2,2 - 2,4	2,3 - 2,5
Drisses métalliques	2,5	
Écoutes et drisses textiles	5	

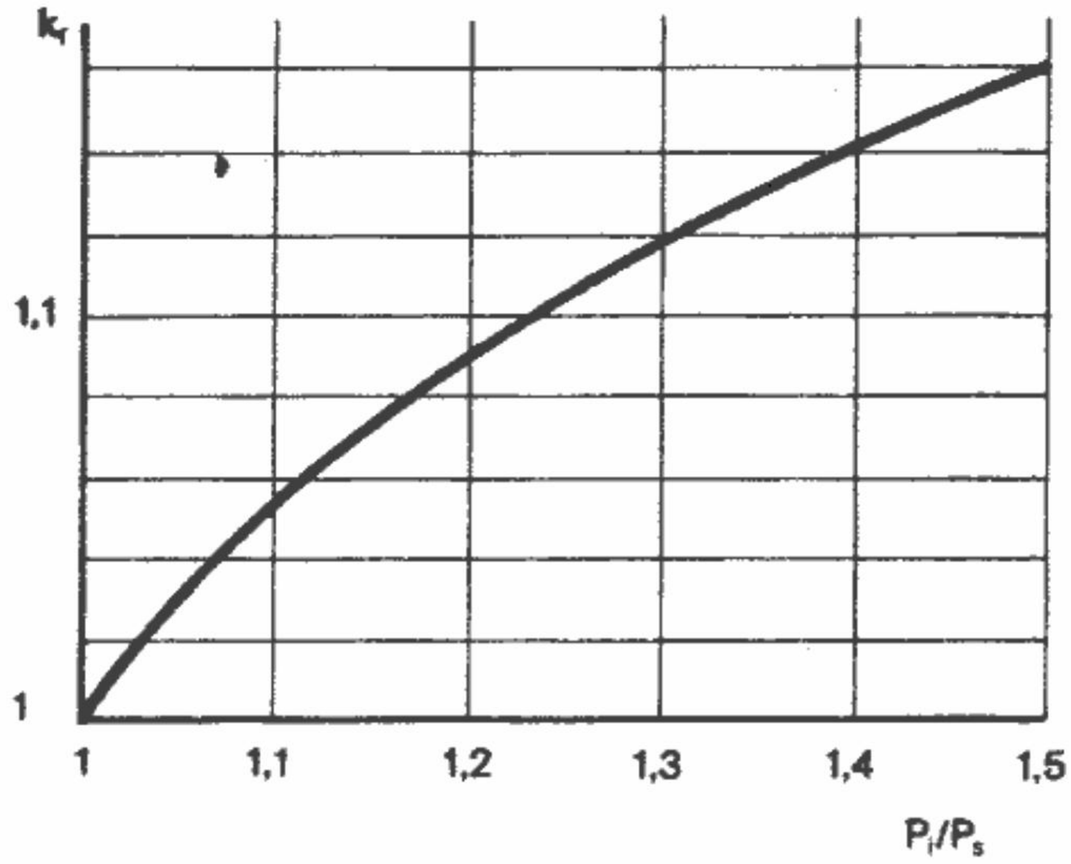


Fig. 6-21 • Courbes du coefficient k_1 correspondant au rapport entre les forces de compression dans les panneaux adjacents.

7 CALCUL DES MOMENTS D'INERTIE DU MÂT

La formule la plus couramment admise pour le calcul des mâts est celle d'EULER * qui donne :

$$I_G = \frac{P \cdot L^2}{k \cdot \pi^2 \cdot E} \text{ avec}$$

P : charge axiale ;
L : longueur libre du tronçon ;
k : coefficient d'encastrement ;
E : module d'élasticité.

Cette formule ne peut cependant s'appliquer qu'à des mâts peu cintrés, dont la flèche — au niveau de chaque panneau — ne dépasse pas la largeur correspondante du profil. Lorsque le cintrage du mât devient trop important, il faut considérer que le moment fléchissant provoquant le cintrage est équilibré par la traction de la voile.

Le mât ne travaille plus alors qu'en compression, mais sa stabilité dépend uniquement de la voile et de l'équilibre des efforts transversaux du gréement. Lorsque celle-ci n'est pas assurée (prise de ris, mauvaise adaptation de la voile au mât par sa coupe ou son réglage, faseyage, etc.) le mât vient travailler en compression et flexion combinées. C'est un tout autre mode de calcul, dans lequel tout le gréement doit être considéré en hyperstatique (allongement des câbles et raccourcissement du profil) qui nous entraînerait beaucoup trop loin.

Nous nous en tiendrons donc pour l'instant au calcul simple de flambage, en tenant compte néanmoins des efforts transversaux.

a ▪ Coefficient d'encastrement

Dans le cas d'un mât, le coefficient d'encastrement est difficile à déterminer car, sauf en tête ou au pied où l'on peut considérer l'appui comme articulé. Aux autres nœuds, la présence des panneaux adjacents va introduire un moment résistant qui constituera un encastrement partiel.

Il en résultera un coefficient variable selon le rapport entre les charges dans les panneaux et l'emplacement de ceux-ci.

La forme de la déformée du mât résultant de la disposition des points d'ancrage du haubanage aura également son importance dans le fait qu'elle permettra ou non, dans un sens ou dans l'autre, cette participation des panneaux adjacents.

Théoriquement, si la charge était constante du haut en bas du mât et que celui-ci soit parfaitement droit, on devrait avoir **k** = 2 pour les panneaux extrêmes et 4 pour les panneaux intermédiaires.

Compte tenu du non respect des conditions ci-dessus le coefficient d'encastrement sera compris entre 1 et 2.

Par exemple, pour un mât à un seul étage de barres de flèche posé sur le pont, le coefficient serait de 1 si la charge était égale dans les deux panneaux. Or, le panneau supérieur, moins chargé que l'autre, apportera à celui-ci une rigidité supplémentaire qui accroîtra sa charge critique.

Le graphique de la FIGURE **6-21** donne la valeur de k_1 en fonction du rapport des charges dans les panneaux inférieur et supérieur, P_i/P_S.

De même, le coefficient d'encastrement d'un mât traversant le pont et reposant sur la quille dépendra du rapport l_i/l_1 des longueurs des panneaux compris entre le pont et la quille et entre les barres de flèche inférieures et le pont. Le graphique de la FIGURE **6-22** donne les valeurs de k_2 dans ces conditions.

* voir TOME 2 - PAGE 103

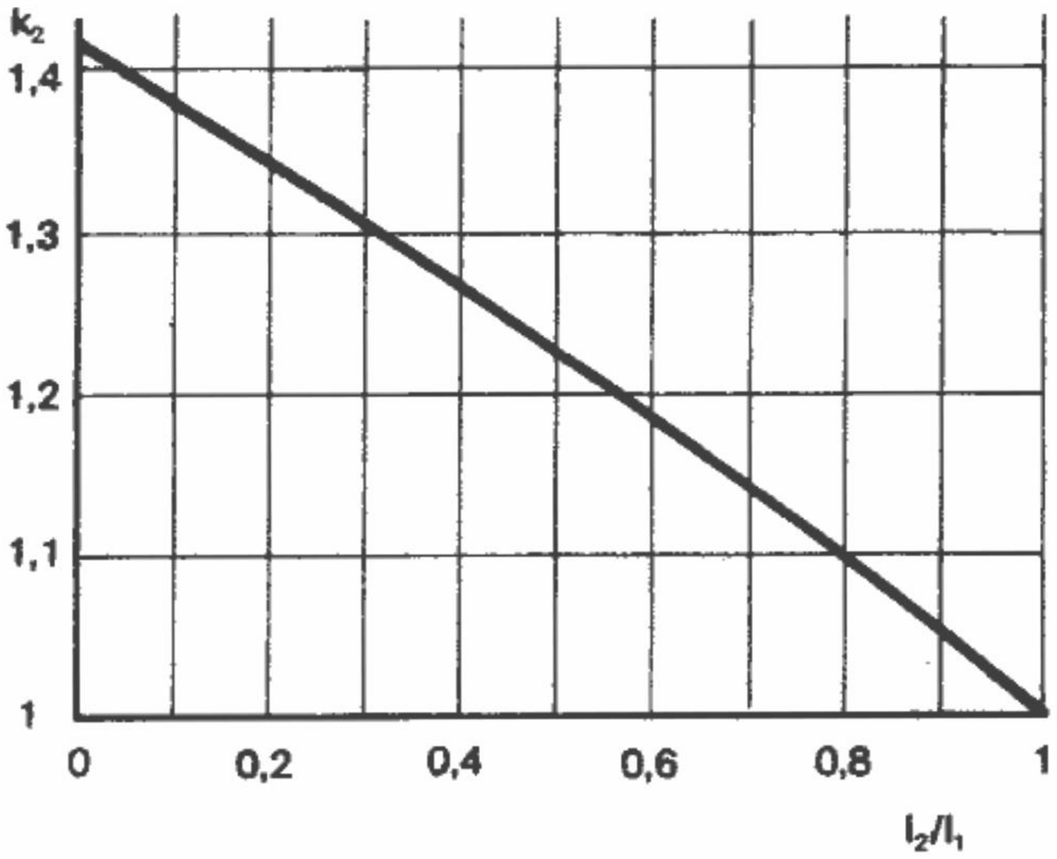


Fig. 6-22 • Courbe du coefficient k_2 correspondant au rapport des longueurs des panneaux adjacents.

Les deux coefficients s'appliquent au panneau inférieur.

Si par exemple le rapport $P_i/P_S = 1{,}25$, on aura $k_1 = 1{,}1$ (FIGURE 6-21). Si, de plus, il est emplanté sur une hauteur égale à 1/3 du panneau inférieur, on aura $k_2 = 1{,}29$ et le coefficient d'encastrement $k = k_1 \cdot k_2 = 1{,}1 \times 1{,}29 = 1{,}42$.

En combinant ces deux coefficients, on peut à peu près couvrir tous les cas.

Dans notre exemple, nous aurons ainsi :

• *En longitudinal :*

Les charges ne sont pas constantes sur toute la hauteur des panneaux et nous prendrons les moyennes de celles situées en tête et au-dessus des barres de flèche, et en dessous et au pied. On aura donc :

$$P_i/P_S = \frac{9\,902{,}60 + 11\,859}{2} \Big/ \frac{7\,666{,}5 + 9\,569{,}7}{2}$$

$$= 10\,880{,}8/8\,618{,}1 = 1{,}26$$

d'où $k = 1{,}05$ pour le panneau inférieur et $1/1{,}05 = 0{,}95$ pour le panneau supérieur.

Les deux panneaux étant de longueur égale, il n'y a pas d'autre coefficient à appliquer. S'il n'en était pas ainsi, on pourrait utiliser le coefficient k_2 correspondant pour le panneau le plus long et $1/k_2$ pour le plus court.

• *En transversal* :

Dans une première étape, nous considérerons le mât comme emplanté entre les barres de flèche et le pont. Nous aurons :

$P_i/P_S = 9\,902{,}6/7\,666{,}5 = 1{,}29$

d'où, pour le panneau intermédiaire, un premier coefficient $k_1 = 1{,}11$.

Comme $l_2/l_1 = 4{,}3/4{,}3 = 1$, $k_2 = 1$

Pour le panneau supérieur $k = 1/k_1 = 0{,}90$

Dans une seconde étape, on considérera que le tout est inversé et que c'est le panneau supérieur qui est emplanté. Nous aurons alors :

$P_i/P_S = 9\,569{,}7/10\,880{,}8 = 0{,}88$

d'où, pour le panneau intermédiaire, un second coefficient $k_1 = 0{,}94$. Comme $l_2/l_1 = 4{,}15/4{,}3 = 0{,}97$ on aura $k'_2 = 1{,}02$. Le coefficient d'encastrement total du panneau intermédiaire sera :

$k_1 \cdot k_2 \cdot k'_1 \cdot k'_2 = 1{,}11 \times 1 \times 0{,}94 \times 1{,}02 = 1{,}06$

Pour le panneau inférieur, on aura $k = 1/k'_1 = 1{,}07$

Ces coefficients d'encastrement sont en fait très pessimistes et correspondraient à une déformation alternée des panneaux. Ce cas peut néanmoins se produire lorsqu'il n'y a pas de grand-voile. Dans des conditions normales, il n'en serait pas ainsi, tout au moins dans le sens transversal, et les coefficients d'encastrement seraient pratiquement doublés. Nous les conserverons malgré tout, considérant que ces faibles valeurs correspondent à un coefficient de sécurité.

Connaissant les coefficients d'encastrement, nous allons pouvoir calculer les moments d'inertie minimums nécessaires dans chaque panneau.

Pour alléger les nombres à traiter, on prend le centimètre comme unité de longueur. Ceci donnera pour l'alliage A-SGMT6, $E = 7 \times 10^5$ et pour la limite élastique : $R_e = 2\,400$ daN/cm²

• *En longitudinal :*

panneau inférieur : $P = 11\,859$ daN,
$l = 645$ cm, $k = 1{,}05$

$$I_L = \frac{11\,859 \times 645^2}{1{,}05 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5} = 680 \text{ cm}^4$$

Panneau supérieur : $P = 9\,569{,}7$ daN,
$l = 635$ cm, $k = 0{,}95$

$$I_L = \frac{9\,569{,}7 \times 635^2}{0{,}95 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5} = 588 \text{ cm}^4$$

• *En transversal :*

Panneau inférieur : $P = 11\,859$ daN,
$l = 430$ cm, $k = 1{,}07$

$$I_T = \frac{11\,859 \times 430^2}{1{,}07 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5} = 297 \text{ cm}^4$$

Panneau intermédiaire : $P = 9\,902{,}6$ daN,
$l = 430$ cm, $k = 1{,}06$

$$I_T = \frac{9\,902{,}6 \times 430^2}{1{,}06 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5} = 250 \text{ cm}^4$$

Panneau supérieur : $P = 7\,666{,}5$ daN,

$l = 415$ cm, $k = 0{,}90$

$$I_T = \frac{7\,666{,}5 \times 415^2}{0{,}9 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5} = 212 \text{ cm}^4$$

Les profils les plus approchants que nous avions trouvés à l'époque de ce calcul étaient un *Francespar F 380 A* ou un *Z Spar Z 500*, dont les caractéristiques étaient les suivantes :

	Francespar F380 A	Z Spar Z 500
Cotes ext.	186 x 130	185 x 125
e	3,6	3,3
S cm²	19	18,5
I_T cm⁴	380	350
I_T/v	58,5	56
I_L cm⁴	730	730
I_L/v	78,5	77

Nous calculerons la charge critique de flambage :
$P_{cri} = k \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I/l^2$ et la contrainte admissible :
$\sigma_a = k \cdot \pi^2 \cdot E/\lambda^2$ dans les différents panneaux pour le profil *Francespar*. Pour cela, on calculera d'abord le rayon de giration $\rho = \sqrt{I/S}$ et l'élancement $\lambda = L/\rho$.

• *En longitudinal :* $\rho = \sqrt{730/19} = 6{,}20$
Panneau inférieur : $\lambda = 645/6{,}20 = 104{,}1$
$P_c = 1{,}05 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5 \times 730/645^2 = 12\,729$ daN
$\sigma_a = 1{,}05 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5/104{,}1^2 = 669{,}4$ daN/cm²
Panneau supérieur : $\lambda = 635/6{,}20 = 102{,}4$
$P_c = 0{,}95 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5 \times 730/635^2 = 11\,882$ daN
$\sigma_a = 0{,}95 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5/102{,}4^2 = 625{,}9$ daN/cm²
• *En transversal :* $\rho = \sqrt{380/19} = 4{,}47$
Panneau inférieur : $\lambda = 430/4{,}47 = 96{,}15$
$P_c = 1{,}07 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5 \times 380/430^2 = 15\,192$ daN
$\sigma_a = 1{,}07 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5/96{,}15^2 = 799{,}6$ daN/cm²
Panneau intermédiaire : $\lambda = 430/4{,}47 = 96{,}15$
$P_c = 1{,}06 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5 \times 380/430^2 = 15\,050$ daN
$\sigma_a = 1{,}06 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5/96{,}15^2 = 792{,}1$ daN/cm²
Panneau supérieur : $\lambda = 415/4{,}47 = 92{,}8$
$P_c = 0{,}9 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5 \times 380/415^2 = 13\,719$ daN
$\sigma_a = 0{,}9 \times \pi^2 \times 7 \times 10^5/92{,}8^2 = 722$ daN/cm²

b ▪ Charge latérale

La charge critique que peut accepter une colonne travaillant au flambage peut être considérablement réduite si une charge latérale lui est appliquée. C'est malheureusement le cas d'un mât qui est soumis à la traction de la grand-voile ou à la poussée de la bôme.

Il n'est guère facile d'introduire cet élément supplémentaire dans une formule permettant d'obtenir directement le moment d'inertie. Il sera plus aisé de procéder à une vérification *a posteriori*, une fois le profil du mât choisi après un calcul des moments d'inertie au flambage seul.

On calculera tout d'abord le moment fléchissant dans le panneau et le plan considérés. Pour simplifier, on ne tiendra compte que d'une force unique ponctuelle résultante pour le panneau inférieur, ou une force uniformément répartie pour les panneaux intermédiaires et supérieurs et sans encastrement aux extrémités. Encore une fois ces conditions sont nettement plus défavorables que la réalité puisqu'elles ne font pas participer les panneaux adjacents.

Pour le calcul du moment, on utilisera les formules suivantes :

- charge ponctuelle, $M = \frac{p \sin k.b \sin k.a}{k \sin kl}$

- charge répartie, $M = \frac{q}{k^2}\left(\frac{1}{\cos \frac{kl}{2}} - 1\right)$, avec

avec
p : charge latérale ponctuelle ;
q : charge par unité de longueur = **p/l ;**
a et **b** : distances aux extrémités de la charge ponctuelle ;
L : longueur du panneau ;
k : $\sqrt{\frac{P}{E \cdot I}}$

De ce moment, on déduira la contrainte maximum par la formule :

$$\sigma_{max} = \frac{P}{S} + \frac{M}{\frac{I}{v}\left(1 - \frac{P}{P_{cri}}\right)}$$

et le coefficient de sécurité σ_a/σ_{max}
Pour notre exemple, on arrive aux résultats suivants :
• *en longitudinal :* $I = 730$ cm, $I/v = 78{,}5$ cm³,
$S = 19$ cm²
Panneau inférieur :
$P = 11\,859$ daN, P_c 12 729 daN, $l = 645$ cm
$p = 161{,}6$ daN, $a = 29{,}8$, $b = 615{,}2$
$k = 0{,}0048$
$M = 80{,}68$ cmdaN
$\sigma_{max} = 639{,}2$ daN/cm²
$C_S = 1{,}05$
Panneau supérieur :
$P = 9\,569{,}7$ daN, $Pc = 11\,882$ daN, $l = 635$ cm
$p = 147{,}86$ daN, $q = 0{,}23$ daN/cm
$k = 0{,}0043$
$M = 3{,}53$ cmdaN
$\sigma_{max} = 504$ daN/cm²

C_S = **1,24**
• *En transversal :* **I = 380** cm⁴, **I/v = 58,5** cm³,
S = 19 cm²
Panneau inférieur :
P = 11 859 daN, P_C = **15 192** daN, **l = 430** cm
p = 40 daN, **a = 153,3**, **b = 276,7**
k = 0,0067
M = 68,85 cmdaN
σ_{max} = **629** daN/cm²
C_S = **1,27**
Panneau intermédiaire :
P = 99 026 daN, P_C = **15 050** daN, **l = 430** cm
p = 49,9 daN, **q = 0,12** daN/cm
k = 0,0061
M = 0,82 cmdaN
σ_{max} = **521** daN/cm²
C_S = **1,52**
Panneau supérieur :
P = 7 666,5 daN, P_C = **13 719** daN, **l = 415** cm
p = 73,3 daN, **q = 0,18** daN/cm
k = 0,0054
M = 1,16 cmdaN
σ_{max} = **403,5** daN/cm²
C_S = **1,79**

Toutes les contraintes sont bien inférieures aux contraintes critiques, donc le mât travaille bien au flambage.

Les coefficients de sécurité peuvent paraître faibles, en particulier dans le sens longitudinal.

Dans la réalité, il sera très rare d'atteindre ces valeurs, car, si le mât est légèrement cintré vers l'avant par le bas-hauban, il se produit un équilibre entre le moment ainsi créé et celui, de sens opposé, provoqué par la traction de la voile entraînant une stabilisation du mât correspondant à un coefficient d'encastrement supérieur à ceux calculés.

Lorsque cet effet stabilisateur de la voile disparaît, par exemple lorsque l'on prend des ris, moment où, de plus, l'équilibre entre les moments de l'étai et de la grand-voile de part et d'autre du point d'attache des galhaubans n'est plus assuré, des accidents peuvent se produire.

A l'étude des résultats, on voit également que ceux-ci pourraient être améliorés par le déplacement de certains points d'ancrage du haubanage.

Dans l'ensemble, une descente de ceux-ci permettrait de mieux équilibrer les contraintes dans les panneaux, mais il faut savoir que de faibles modifications peuvent avoir des conséquences importantes.

Par ailleurs, il est bon d'avoir des coefficients plus élevés dans les panneaux supérieurs où les efforts dynamiques sont les plus sensibles.

c ▪ Flambage local

Des tubes minces comme le sont les profils de mât, peuvent périr à un taux de contrainte plus faible que celui déterminé par un flambage général.

C'est normalement dans la partie la moins courbe de la section que se produit le flambage local. Pour un profil elliptique, ce sera la paroi latérale de rayon moyen **r**.
La contrainte admissible sera pour un tube :
$\sigma_{CO} = R_e/[1 + 3\ (r/e)\ (R_e/E)]$
Dans notre exemple, avec :
R_e = 24 daN/mm², **r : 122,5** mm et **e = 3,6** mm,
on a σ_{CO} = **17,78** daN/mm², ce qui reste très supérieur aux contraintes admissibles du flambage général.

Cette vérification est néanmoins nécessaire, en particulier pour les gros profils ou lorsque, désirant augmenter le moment d'inertie, on aboutit à des épaisseurs de paroi trop faibles.

C ▪ MÉTHODE SIMPLIFIÉE ❋❋❋❋❋❋❋

La méthode de calcul que nous venons d'étudier est longue, si elle est relativement précise, et cette précision n'est pas toujours nécessaire, d'autant que les coefficients de sécurité appliqués offrent une garantie assez large. En fait, j'ai tenu à la développer essentiellement pour montrer, au fur et à mesure de l'analyse, les facteurs qui constituent les contraintes globales sur le mât et son gréement.

Dans la pratique, il ne sera généralement pas nécessaire d'y recourir ou, dans les cas extrêmes, il sera préférable d'utiliser la méthode des éléments finis à condition d'y introduire des données correctes en ce qui concerne les efforts exercés par la voilure.

Dans la majorité des cas, on utilisera une méthode simplifiée, mise au point par le cabinet SPARKMAN & STEPHENS, et dont la version la plus à jour a été publiée en 1982 dans le rapport du 12ème symposium de l'AIAA (2).

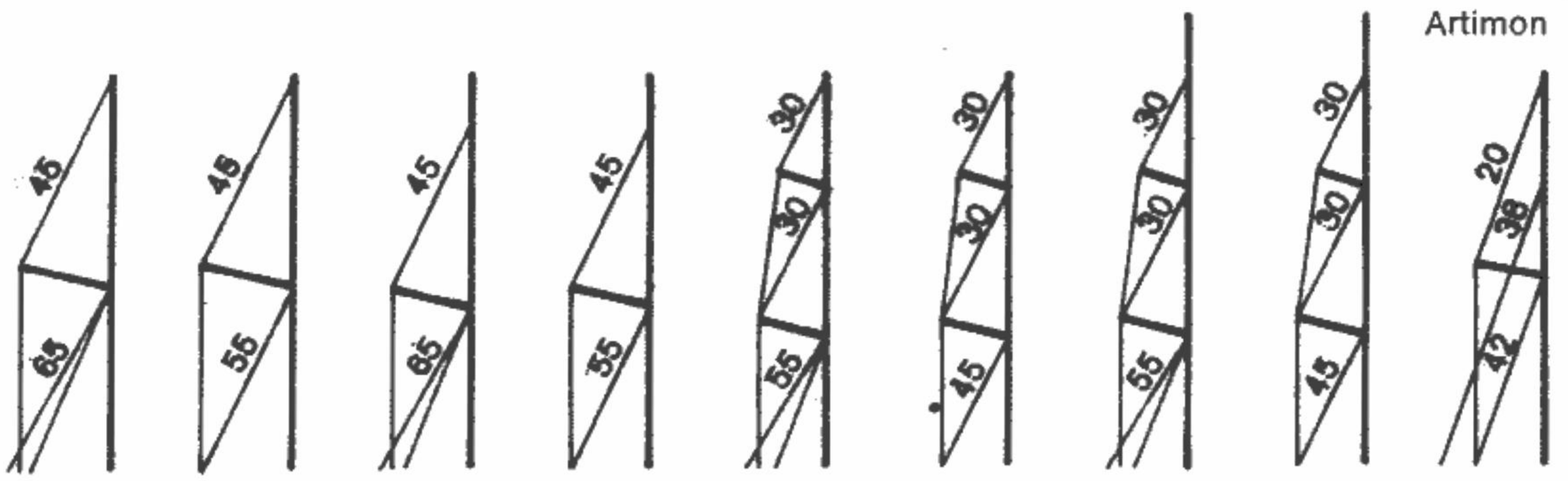
Cette méthode est appliquée par de nombreux architectes avec quelques variantes résultant de l'expérience personnelle. Elle est tout à fait adaptée aux voiliers de croisière classiques avec, pour les gréements en tête, un rapport surface de génois/surface de grand-voile voisin de 2. Il appelle quelques remarques, repérées par un indice, que nous développerons ensuite.
Le processus est le suivant :

a) Efforts dans le mât et le gréement

$$P_T = \frac{MR_{30} \times 1{,}5}{e} \text{ avec :}$$

TABLEAU 6/II

RÉPARTITION DES EFFORTS DANS LE HAUBANAGE TRANSVERSAL



P_T : effort vertical sur les cadènes et le mât dû au gréement transversal ;

MR_{30} (1) : moment de redressement à 30° de gîte avec déplacement à mi-charge ;

e (2) : distance de la cadène à l'axe du mât ;

1,5 : coefficient pour une gîte plus importante.

b) **Compression dans le mât**

$P = 1{,}85 \times P_T$ où :

1,85 : coefficient pour tenir compte du gréement longitudinal. (3)

c) **Répartition des charges dans les différents éléments du gréement** (TABLEAU **6-II**) **(4)**

d) **Coefficients de sécurité du gréement**

Câbles : galhaubans : **2,5 - 2,75** ;

bas-haubans et étais : **3**.

Barres : haubans et galhaubans : **2,25 - 2,5** ;

étais : **3**, cadènes : **4**.

e) **Mâts et gréements d'artimon**

$$P_T = \frac{MR_{30}}{e} \times 1{,}5 \times C \text{ avec :}$$

C = 1/3 pour les yawls et ketchs normaux ;

C = 1/2 pour les ketchs à grand artimon.

$P = P_T$

TABLEAU 6/III

VALEURS DE C POUR MÂT EN ALLIAGE LÉGER EMPLANTÉ SUR LA QUILLE

	Coefficient d'EULER k	1 étage de barres de flèche	TRANSVERSAL	LONGITUDINAL							
			Plusieurs étages de barres de flèche	L jusqu'à l'étai			L jusqu'à l'étai				
				Toutes longueurs et L_f < 10 m avec étai largable			10 m < L_f < 14 m			Plus de 14 m	
				En tête		7/8	En tête		7/8	En tête	
				Double bas-haub.	Bas-haub. simple et bas-étai	Double bas-haub.	Double bas-haub.	Bas-haub. simple et bas-étai	Double bas-haub.	Double bas-haub.	
C_S		2,1	2,5	1,2		1,15	0,8		1,15	0,67	
Panneaux inférieurs	2,25	**1,34**	**1,61**	**0,77**	**0,64**	**0,74**	**0,51**	1 étage **0,51**	**0,74**	**0,43**	
Panneaux supérieurs	1,5	**2,16**	**2,4**					2 étages **0,43**			

- Pour un gréement avec un seul bas-hauban dans le plan du mât et sans bas-étai, ajouter 10 % au moment d'inertie longitudinal calculé pour des bas-haubans double.
- Pour un voilier de plus de 14 m de flottaison avec bas-étai largable, prendre **L** jusqu'au capelage du bas-étai avec **C = 0,45**.
- Pour un mât posé sur le pont, on admet un coefficient d'EULER inférieur de 20 % donc : **C** sur pont = **1,25 C** emplanté.
- Pour un mât en spruce $I_{sp} = I_{alu}/0{,}139$. (5)

Coefficients de sécurité du gréement :
yawls : haubans **1,5**, cadènes **2** ;
ketchs : haubans **2**, cadènes **2,5**.

f) Moment d'inertie des mâts

$$I_{cm^4} = \frac{C_S \cdot P \cdot L^2}{k \cdot \pi^2 \cdot E} = C \cdot P \cdot L^2 \cdot 10^{-8} \text{ avec :}$$

P : compression sur le mât en daN ;
L : longueur du panneau de mât en cm ;
C : coefficient donné dans le TABLEAU **6-III**.

g) Étai (6).

Le graphique de la FIGURE **6-23** donne directement le diamètre de l'étai en fonction de MR_{30}/h où **h** est la distance verticale entre centre de voilure et centre de dérive, celui-ci étant pris à 40 % du tirant d'eau. La résistance du câble ou de la barre est comptée à **125** daN/mm² sur le diamètre nominal. Il n'est pas prévu de réduction pour un matériau de résistance supérieure. Les embouts doivent avoir une résistance supérieure de 5 % à celle du câble.

h) Gréement courant

Pour les drisses de foc et de grand-voile, STEPHENS donne une table de correspondances avec le dimensionnement de l'étai. Le TABLEAU **6-IV** en est l'adaptation métrique à laquelle ont été ajoutés les écoutes de génois et de grand-voile ainsi que les drisses, bras, écoutes et retenues de spinnaker. Il est valable pour des bateaux de croisière ayant des surfaces unitaires de grand-voile, de génois maxi et de spinnaker dans des rapports voisins de 1, 2 et 4. Les résistances à la rupture en daN/mm² indiquées correspondent aux câbles Sarma, aux cordages Glenstein Cup pour les drisses et les bras de spinnakers, aux cordages Glenstein Gemini pour les écoutes.

On pourra également se reporter aux TABLEAUX DES PAGES **346** ET **347** de *Voiles et Gréements* (éd. de 1982), en particulier pour la correspondance avec des cordages en Kevlar.

Pour les cordages, la résistance n'est pas seule à prendre en compte car on ne peut descendre en dessous d'un certain diamètre si l'on veut conserver une prise en main correcte. Le diamètre de 8 mm est alors un extrême minimum. Quant au diamètre de l'écoute de grand-voile il dépend bien sûr du nombre de brins du palan. Le diamètre indiqué ici serait celui d'une écoute directe, sans palan frappée en bout de bôme.

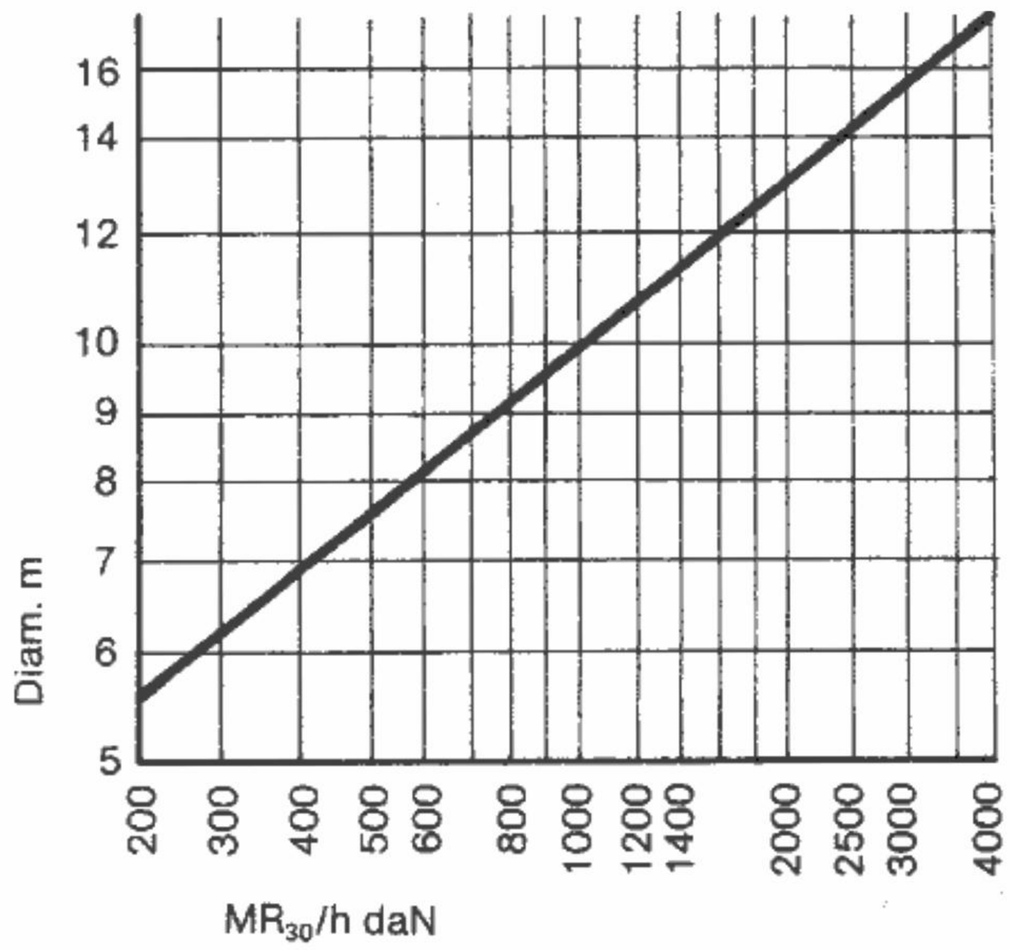


Fig. 6-23 • Diamètre de l'étai en fonction de MR_{30}/h, basé sur une résistance à la rupture R_r = **125** daN/mm², la section étant calculée à partir du diamètre extérieur, qu'il s'agisse de câble 1 x 19 ou de monofil.

1 REMARQUES SUR LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

(1) Nous savons que le moment de redressement est égal au moment de chavirement, lui-même produit de $F_y \cdot h$, force latérale de la voilure par distance verticale entre les centres de voilure et de dérive.

Or, le moment du gréement par rapport au plan horizontal de l'étambrai est $F_y \cdot h'$, **h'** étant la hauteur du centre de voilure au-dessus de l'étambrai. On peut penser qu'il y a là le désir d'introduire un certain coefficient de sécurité ou de compenser d'autres éléments additionnels augmentant le moment du gréement et la charge sur la cadène, tels que le moment exercé par la composante verticale de la traction dans l'écoute de foc, ou le poids de la mâture.

(2) Les galhaubans et les bas-haubans n'aboutissent pas toujours sur des cadènes écartées également de l'axe de la coque. Dans ce cas, il faut calculer un **e** intermédiaire tel que :

$$e = \frac{(\Sigma C_{gal} \cdot e') + (C_{bas\text{-}haub} \cdot e'')}{\Sigma C_{gal} + C_{bas\text{-}haub}} \text{ où}$$

C est le pourcentage de P_T correspondant au hauban concerné et donné dans le TABLEAU **6-II** ;
e' et **e"** les écartements respectifs des cadènes de galhaubans et bas-haubans.

Par exemple si, dans un gréement à deux étages de barres de flèche, la cadène de bas-hauban est à **e" = 1,25** m et celle des galhaubans est à **e' = 1,20** m

$$e = \frac{(30 + 30)\ 1{,}20 + 45 \times 1{,}25}{30 + 30 + 45} = 1{,}22 \text{ m}$$

(3) Le coefficient **1,85** paraît un peu faible, même pour des voiliers où l'on recherche une flèche minimum de l'étai et il ne semble pas tenir compte de la traction du retour des drisses. On peut donc le porter à **2**.

TABLEAU 6/IV

CORRESPONDANCES ENTRE ÉTAI, DRISSES ET ÉCOUTES

Étai 1 x 19		Drisse, génois et spi		Drisse G.V.		Écoute génois	Écoute G.V.	Écoute Spi	Bras spi	
Ø mm	R_r daN	7 x 19	Cup	7 x 19	Cup				7 x 19	Cup
19	27000	11,2	-	-	-					
15,9	22000	9,6	18	8	16	16	16	16	9,6	18
14,3	17800	8	16	8	16	16	16	16	8	18
12,7	13600	8	16	8	16	14	16	16	8	18
11,2	10800	8	16	6,4	14	14	14	14	8	16
9,6	8200	6,4	14	5,6	14	12	14	14	-	16
8	5800	5,6	14	4,8	12	12	12	12	-	14
7	4650	4,8	12	4	10	10	10	10	-	12
6,4	3650	4	10	3,2	8	8	8	8	-	10
5,6	2850	4	10	3,2	8	8	8	8	-	10
4,8	2050	3,2	8	2,4	8	8	8	8	-	8
4	1450	3,2	8	2,4	8	8	8	8	-	8
3,2	900	2,4	8	2,4	8	8	8	8	-	8

RÉSISTANCE À LA RUPTURE DES CÂBLES ET CORDAGES EN daN/mm²

Câbles Ø mm	2,4	3,2	4	4,8	5,6	6,4	8	9,6
Câble 7 x 19	350	660	950	1350	1900	2500	3900	5700
Cordages Ø mm	6	8	10	12	14		16	18
Glenstein Cup	565	1040	2040	3120	3920		5780	6900
Glenstein Gemini	755	1160	2270	3140	4000		4890	6200

Dans l'exemple analysé précédemment, il atteignait 2,05 en y incluant les retours de drisses.

(4) Pour les bas-haubans, il ne faut pas oublier qu'il s'agit de la composante verticale de la charge sur la cadène, la résultante dans les haubans sera donc **F/cos** α, α étant l'angle du hauban avec le mât dans le plan transversal.

Dans le cas de bas-haubans double, celui de l'avant subit une charge plus élevée que celui de l'arrière puisqu'il équilibre la traction de la voile vers l'arrière, rôle rempli autrement par le bas-étai.

Néanmoins, comme le coefficient de sécurité du bas-hauban arrière doit être supérieur, on partagera la charge également sur les deux bas-haubans. Le coefficient plus fort par rapport au bas-hauban simple tient compte vraisemblablement de l'accroissement dû à leur angulation dans le plan longitudinal et aux variations plus fortes dues aux effets dynamiques.

Le tableau ne donne pas les charges dans les bas-étais intermédiaires. On pourra estimer que la charge longitudinale qu'ils ont à équilibrer sera égale à :

- pour le bas-étai : **1,3 %** de la charge du bas-hauban,
- pour l'étai inter. : **2,4 %** de la charge du galhauban inter.

S'il n'y a qu'un seul bas-étai entre deux étages de barres de flèche, comme dans notre exemple, on prendra la somme des deux charges précédentes. Enfin, il faut noter que ces coefficients ne tiennent pas compte des longueurs respectives des barres de flèche et de l'écartement des cadènes.

On peut donc penser que l'on considère cette dimension constante. Dans d'autres conditions, on constate en effet des transferts d'efforts d'un hauban sur l'autre, ce qui explique en partie les différences des coefficients entre galhaubans et bas-haubans alors qu'il n'y en avait pratiquement pas dans l'exemple étudié, la sous-évaluation de la proportion des efforts dus à l'étai représentant le solde de la différence.

On trouve aujourd'hui parfois des gréements comportant trois et même quatre étages de barres de flèche. Pour trois étages, on pourra prendre les pourcentages suivants en partant du bas-hauban : **40 - 27,5 - 22,5** et **20**, et pour quatre étages : **37,5 - 25 - 20 - 17,5 - 15**.

Sparcraft qui effectue lui-même les calculs nécessaires au choix des profils de mât et de bôme, à partir d'un protocole de données fournies par l'architecte, utilise pour un mât à quatre étages de barres de flèche des proportions différentes : **30 - 16 - 10,5 - 8,5 - 35**. On peut penser que la surcharge importante prévue pour le galhauban supérieur est destinée à en limiter l'allongement afin de maintenir le mât dans un plan plus vertical.

(5) pour un matériau d'un module d'élasticité **E'** différent de l'alliage léger, on a

$$I_{E'} = \frac{I_{alu} \times 7\,000}{E'}$$

Ici le module d'élasticité du spruce est pris pour **975** daN/mm².

(6) Il n'est pas donné de valeur de charge pour le pataras. On pourra prendre **70** % de l'étai, de même pour une bastaque équilibrant l'étai dans un gréement **7/8**. Pour celle-ci, on pourra tenir compte en plus de la différence d'angle.

2 APPLICATION A L'EXEMPLE PRÉCÉDENT

Rappelons les caractéristiques nécessaires au calcul simplifié et comparons aux résultats précédents.

RM_{30} = 3 360 mdaN

h = 6,61 m

e = 1,26 m

a) P_T = 3 360 x 1,5/1,26 = 4 000 daN

b) P = 4 000 x 1,85 = 7 400 daN

contre **11 859** soit, pour ce dernier un coefficient de sécurité initial de **1,6** par rapport à la méthode simplifiée. Avec un coefficient de **2,05**, que je juge plus réaliste, on arrive à **8 200** daN.

c) Charge dans les haubans

Galhauban supérieur :

2,75 x 4 000 x 30/100 cos 13,74° = 3 397 daN

contre **4 103,4** daN

Galhauban intermédiaire :

2,75 x 4 000 x 30/100 cos 14,58° = 3 410 daN

contre **4 010,4** daN

Bas-hauban :

3 x 4 000 x 45/100 cos 14,03° = 5 566 daN

contre **4 689,6** daN.

Les différences, en moins sur les galhaubans et en plus sur les bas-haubans, correspondent aux transferts de charge dûs au raccourcissement progressif des barres de flèche. Les totaux sont d'ailleurs sensiblement égaux : 12 373 daN contre 12 803,4 daN.

Étai :

RM_{30}/6,61 = 508,72 donnant, d'après le GRAPHIQUE **6-23, PAGE 104**, un diamètre de **7,7** correspondant à une résistance de **5 820** daN contre **5 834** daN.

Bas-étai :

3 x 4 000 x 45 x 1,3/100² + 2,5 x 4 000 x 30 x 2,4/100² = 142, 2/sin 15° = 549,4 daN contre **827** daN

Le diamètre de câble monotoron le plus approchant sera de **8** mm pour l'ensemble des haubans et de l'étai, de **7** mm pour le pataras et de **3,2** pour le bas-étai.

d) Moments d'inertie du mât (TABLEAU **VI-3**)

Transversal :

Panneau inférieur : **1,61 x 7 770 x 430² x 10^{-8} x 1,25 = 289** cm⁴

Panneaux supérieurs : **2,4 x 7 770 x 415² x 10^{-8} = 321** cm⁴

Longitudinal :

Panneau inférieur : **0,64 x 7 770 x 1 280² x 10^{-8} x 1,25 = 1 018** cm⁴

Contre **380** et **730** pour le profil choisi.

On constate que le moment d'inertie longitudinal est plus fort que pour celui-ci. Mais le coefficient **0,64** ne concerne que les gréements avec un étage de barres de flèche, or nous en avons deux. Si nous prenons, comme pour les bateaux de 10 à 14 m, un coefficient de **0,51** le moment d'inertie tombe à **811** cm⁴, ce qui est beaucoup plus proche. La différence confirme le taux de travail plus élevé en longitudinal déjà constaté.

En fait, l'on constate que la plupart des profils du commerce ont un rapport des moments d'inertie voisin de 2 ou même supérieur, en particulier si le nombre de barres de flèche est accru.

Pour des mâts souples travaillant en compression et flexion, et non plus en flambage, les moments d'inertie des profils devraient être plus proches d'un rapport 1.

e) Gréement courant

A partir du diamètre de l'étai (**8** mm), le TABLEAU **VI-4** nous donne :

- Drisse génois et spi : câble **7 x 19 Ø 14**;
- Drisse grand-voile : câble **7 x 19 Ø 4,8** avec cordage **Ø 12**;
- Écoutes : **Ø 12**;
- Bras de spi : **Ø 14**.

Il est bien certain que ces diamètres d'écoutes correspondent aux voiles maximums les plus lourdes et que d'autres jeux doivent être prévus pour les voiles plus légères.

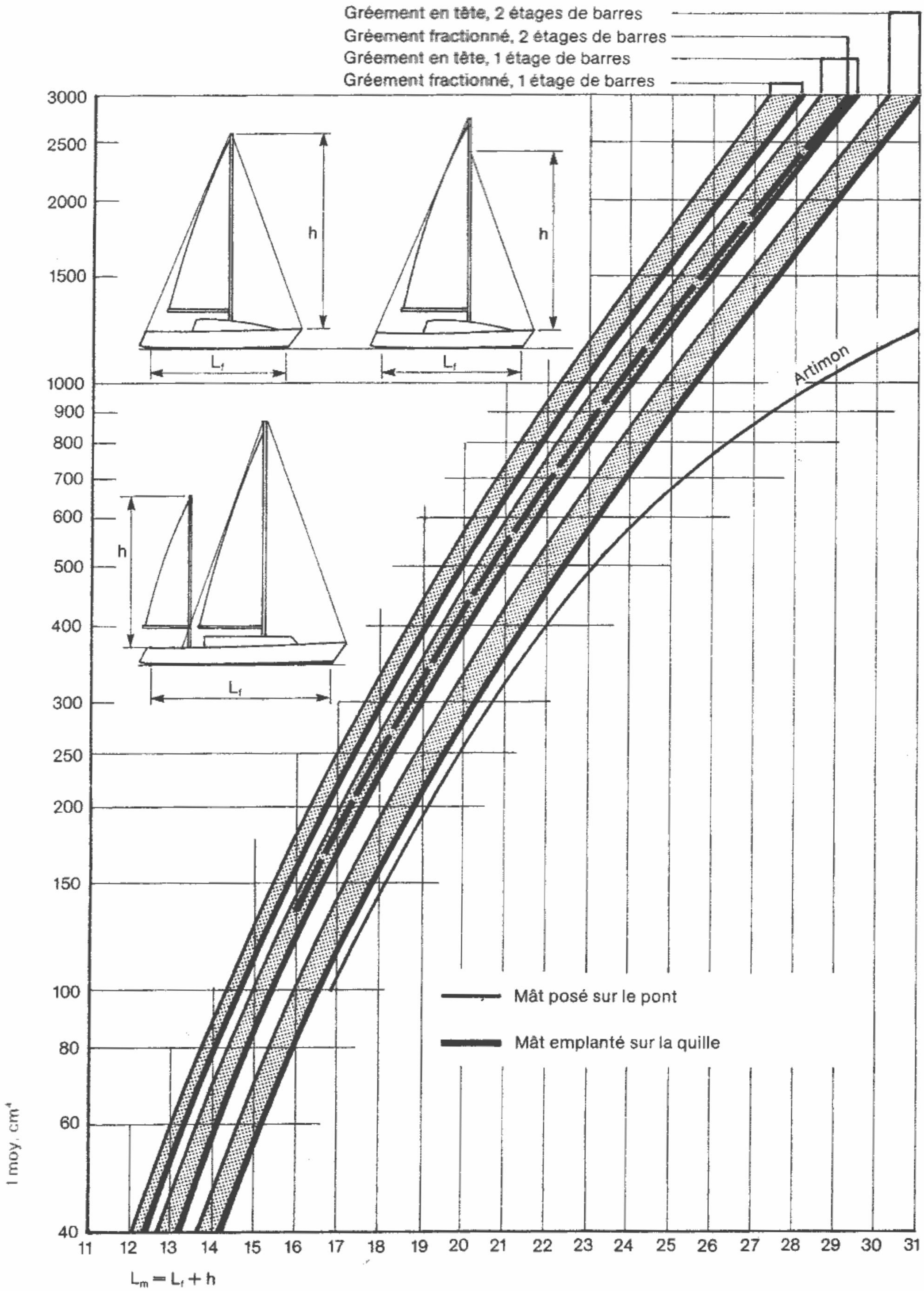


Fig. 6-24 • Graphique donnant une première approximation du moment d'inertie moyen $\mathbf{I_{moy} = (I_x + I_y) \div 2}$, en fonction de la somme de la longueur de flottaison et de la hauteur du capelage de foc ou du mât d'artimon.

3 GRAPHIQUE PROCTOR

Le fabricant de mâts *Proctor* a établi un graphique permettant de déterminer rapidement le type de profil à utiliser en fonction de deux caractéristiques du voilier : sa longueur de flottaison et la hauteur du triangle avant. Je l'ai retracé à partir des moments d'inertie transversaux. Le moment d'inertie longitudinal est à peu près le double du transversal (FIGURE **6-24**).

Ce graphique est pratique pour une détermination rapide, au niveau de l'avant-projet par exemple, mais n'est pas suffisant, à mon avis, lorsque l'on recherche une précision ou une sécurité mieux définies.

4 MÂT D'ARTIMON

La force développée par la voile ayant été déterminée à partir des coefficients de répartition définis au début de ce chapitre, le calcul est identique à celui d'un grand-mât sans foc.
Dans la méthode simplifiée, on a :

$$\mathbf{P_T = \frac{MR_{30} \times 1{,}5}{e \times C}} \quad \text{avec}$$

C = 3 pour un yawl ;
C = 2 pour un ketch avec un grand artimon.
Les coefficients de sécurité sont les suivants :
- yawls : haubans **1,5** ; cadènes **2** ;
- ketchs : haubans **2**, cadènes **2,5**.

Les charges dans les haubans sont évaluées à :
- **20** % de $\mathbf{P_T}$ pour le galhauban ;
- **42** % de $\mathbf{P_T}$ pour le bas-hauban ;
- **38** % de $\mathbf{P_T}$ pour le hauban intermédiaire tirant vers l'avant.

5 CALCUL DE LA BÔME

Sa tenue est assurée au vit de mulet, au (x) point (s) d'attache de l'écoute et au point d'attache du hale-bas.

Dans la première analyse, nous avons admis que l'effort normal à la bôme suivait une répartition triangulaire avec un maximum au point d'écoute et **0** au point d'amure. La coupe des grands-voiles modernes conduit en fait à une répartition de l'effort centrée beaucoup plus vers le point d'écoute. D'autre part, le hale-bas constitue un point de fixation de plus en plus important surtout, bien sûr, dès que l'on s'écarte de l'allure du près serré.

Pour tenir compte de ces considérations, on définira la bôme comme une poutre travaillant en flexion sous l'effort d'une résultante située aux 4/5 de sa longueur en partant du vit de mulet (soit **0,8 E**) et soumise à une force de compression axiale appliquée au point d'écoute.

Nous estimerons par ailleurs que le moment exercé par cette force est équilibré pour moitié par les moments exercés par l'écoute et le hale-bas.

Dans certains cas, ces conditions peuvent être encore plus dures, comme par exemple pour un grand voilier transocéanique, pour lequel on pourra estimer que le hale-bas peut être amené à supporter en totalité l'effort de la voile.

Ayant déterminé la valeur de $\mathbf{F_y}$ de la grand-voile suivant la méthode établie PAGE **88**, nous estimerons ces forces à :
$\mathbf{3\ F_{yg\text{-}v} \cos \alpha = F_Z}$
$\mathbf{3\ F_{yg\text{-}v} \sin \alpha = F_X}$
avec $\alpha = \mathbf{\tan^{-1} E/P}$
Pour notre exemple (FIGURE **6-25**) nous aurons avec :
E = 350 cm, **e = 100** cm et α **= 17,07°**
$\mathbf{F_Z = 3 \times 236{,}6 \cos 17{,}07° = 678{,}5}$ daN
$\mathbf{F_X = 3 \times 236{,}6 \sin 17{,}07° = 194{,}5}$ daN
Le moment de $\mathbf{F_Z}$ par rapport au vit de mulet sera :
$\mathbf{M = F_Z \,.\, 0{,}8\ E = 678{,}5 \times 0{,}8 \times 350 = 189\ 980}$ cmdaN
et la traction verticale sur le hale-bas :
$\mathbf{F_{h\text{-}b} = 189\ 980/2 \times 100 = 950}$ daN

Cet effort engendrera une compression supplémentaire dans la partie avant de la bôme :
$\mathbf{C = 950 \times 100/64 = 1\ 484}$ daN

Sous l'effet de la traction du hale-bas, la bôme fléchira. Le moment fléchissant maximum se situera au point d'attache du hale-bas et sera :
$\mathbf{M_{f\ max} = F_{h\text{-}b}\ (0{,}8\ E - e)\ .\ e/(0{,}8\ E) =}$
950 (0,8 x 350 -100) x 100/0,8 x 350 = 61 071,4 cmdaN
Avec $\mathbf{R_p = 2\ 400}$ daN/cm², on devra avoir :
$\mathbf{I/v \geq 61\ 071{,}4/2\ 400 = 25{,}45}$ cm³

Le profil *F 340* de *Francespar* nous donne les caractéristiques suivantes :
- dimensions : **101** x **140** mm
- section : **13,7** cm²
- $\mathbf{I_y}$: **150** cm⁴
- $\mathbf{I_Z}$: **370** cm⁴

Dissymétrique, son centre de gravité sera à environ **8** cm de la base, donnant un $\mathbf{I_Z/v = 370/8 = 46{,}25}$ cm³ pour le dessous, travaillant en traction, et $\mathbf{I_Z/v = 370/6 = 61{,}67}$ cm³ pour le dessus, travaillant en compression.

La charge critique que peut supporter la bôme sera :
$\mathbf{P_{cri} = \pi^2 \times 700\ 000 \times 370/350^2 = 20\ 867}$ daN

Le moment de flexion appliqué à la bôme sera la somme des moments dus à la charge verticale et au décentrement de la charge de compression.

Ce décentrement sera égal à la distance entre le point d'écoute et l'axe horizontal du vit de mulet, soit dans notre cas environ **8** cm.

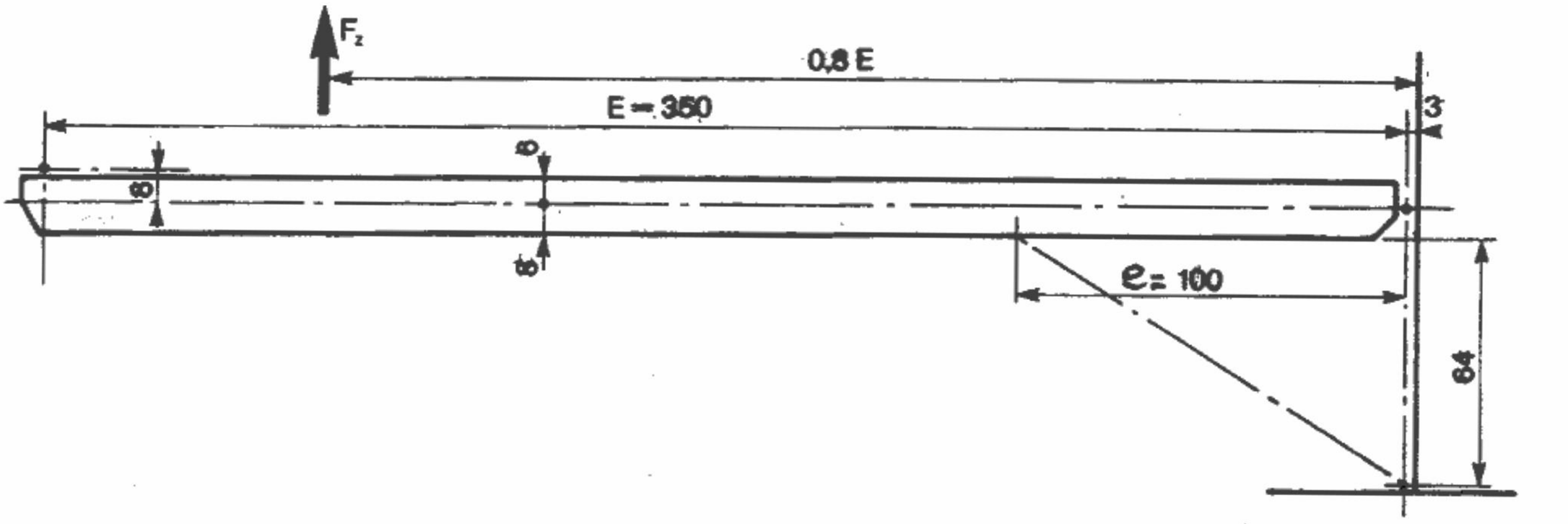


Fig. 6-25 • Géométrie de la bôme de l'exemple.

On aura donc :
M = 61 071,4 + (194,5 x 8) = 62 627,4 cmdaN
Utilisant la même méthode de calcul que pour le mât, on aura :

$$\sigma_{max} = \frac{194,5}{13,7} + \frac{62\,627,4}{46,25\,(1 - 194,5/20\,867)} = 1\,381 \text{ daN/cm}^2$$

pour le dessous et

$$\sigma_{max} = \frac{194,5}{13,7} + \frac{62\,627,4}{61,67\,(1 - 194,5/20\,867)} = 1\,039,3 \text{ daN/cm}^2$$

pour le dessus, soit au moins un coefficient de **1,9** par rapport à la limite élastique de l'alliage.

La partie de la bôme située entre le point d'attache du hale-bas et le vit de mulet est soumise à une compression supplémentaire.

Situé en dessous du profil, le point d'application de celle-ci induira un moment de flexion de sens contraire à celui de la compression au point d'écoute. Le tronçon concerné étant, de plus, assez court, les contraintes engendrées ne seront que de compression et égales à **P/S**, soit dans notre exemple :
σ_c **= 1 484/13,7 = 108,3** daN/cm²
qui viendront s'ajouter à σ_{max} du dessus de la bôme pour donner **1 039,3 + 108,3 = 1 147,6** daN/cm²

Tandis que le taux de contrainte de la partie inférieure sera réduit d'autant, soit :
1 381 - 108,3 = 1272,7 daN/cm²

Dans le sens transversal, les efforts normaux sur la bôme sont faibles mais peuvent accidentellement devenir importants, par exemple, au vent arrière, si elle engage sur un coup de roulis et que l'on a placé une retenue. Ces efforts étant difficiles à déterminer, on prendra pour le moment d'inertie transversal de la bôme entre **0,5** et **0,6** du moment d'inertie vertical.

La bôme est soumise également à un moment de torsion dû au décalage vertical entre la fixation de la voile (rail et points) et l'attache de l'écoute lorsque le vit de mulet ne comporte pas d'articulation dans l'axe longitudinal. Ce moment reste cependant faible et peut être réduit par le dessin de la ferrure d'attache de l'écoute.

Le moment fléchissant diminue à peu près linéairement du point d'attache du hale-bas vers le point d'écoute, il est tentant d'alléger la bôme en ménageant des ouvertures dans ses flancs.

Celles-ci devront être de largeur progressivement accrue et les entretoises restantes devront être inclinées alternativement à 45° pour résister aux contraintes de cisaillement (FIGURE 6-26).

Fig. 6-26 • Allégement de la bôme.

D ▪ MATÉRIAUX ET FORMES DES PROFILS DE MATS

Aujourd'hui, la quasi totalité des mâts sont réalisés en alliage léger à traitement thermique à base de magnésium, silicium et manganèse A-SGM traité T6. Les différences de caractéristiques que l'on peut constater proviennent essentiellement de la teneur en silicium ou autres impuretés et du processus du traitement thermique.

Pour certains voiliers de haute compétition à courte durée de vie, tels que les 12 m J.I. de la Coupe de l'America, on a utilisé des alliages aluminium-cuivre (série 2000) dont les résistances en traction et compression peuvent être supérieures au double des alliages de la série 6000. Mais leur résistance à la corrosion est très mauvaise, ils sont très difficiles à extruder et impossibles à souder, donc utilisés exclusivement sous forme de tôles ployées et assemblées par collage et rivetage.

Cependant d'autres ont été ou seront utilisés pour la réalisation de mâts : bois, acier, composites, etc.

L'intérêt d'un matériau nouveau par rapport à un autre connu se mesure essentiellement par le rapport E_f/d^3 * du fait que c'est le module d'élasticité qui définit la charge critique. Mais, on doit tenir compte également de la résistance en compression et de son rapport R_{ec}/d puisque les flèches en dépendent et que les contraintes locales dans un mât sont toujours en compression — tout au moins pour un mât haubané. Il est intéressant de reprendre alors les valeurs du TABLEAU IV-11 - TOME 2 - PAGE 137 :

	R_{ec}/d	E_f/d^3
Spruce	8,7	11742
A-SGM T6	10,74	356
Acier inoxydable	3,4	37,5
UD verre R/époxyde	33,3	734
UD carbone HT/époxyde	98,6	3844

On notera l'excellente performance du spruce qui, même avec un large coefficient de sécurité pour tenir compte des irrégularités de structure possibles, vient pratiquement à égalité avec le stratifié de carbone. La résistance en compression de celui-ci est souvent superflue sauf pour des sections de grande dimension et à paroi mince où le flambage local devient le facteur le plus critique. Ce qui ne sera pratiquement jamais le cas avec un mât en spruce étant donné l'épaisseur des parois.

A l'autre extrémité, on voit que l'acier inoxydable, parfois envisagé pour la fabrication de mâts, ne présente aucun intérêt.

* voir TOME 2, CHAPITRE 4, § 2, PAGE 136.

Du fait de ses caractéristiques, le composite époxy-carbone s'est considérablement développé pour la fabrication des mâts de grandes unités ou de haute compétition. Par rapport à un mât en alliage léger, le gain de poids peut atteindre, dans ces grandes dimensions, **50** %.

Ceci se traduit bien sûr par un gain sur la stabilité, ce qui permet un allégement général du navire à charge utile égale (on estime que **1** kg gagné sur un mât permet de gagner **10** kg sur le déplacement), mais aussi un gain appréciable sur le moment de tangage et, par conséquent le passage dans la vague.

Par ailleurs, le composite est beaucoup moins sensible à la corrosion marine et, en particulier, à la corrosion électrolytique en présence de l'acier inoxydable (en revanche, il réagit très mal en présence des alliages légers).

Son principal handicap réside d'abord dans son prix, la matière première est environ **50** % plus chère, et surtout la réalisation par moulage nécessite beaucoup plus d'heures de travail que le simple montage de ferrures sur un tube extrudé. Pour des voiliers de croisière de **12** à **15** m, le prix d'un mât en composite est de **2** à **5** fois supérieur à celui d'un mât en métal.

La largeur de cette fourchette est due à la grande différence de prix que l'on rencontre dans les mâts en métal. La différence entre un mât en métal et en composite se réduit avec la taille et devient nulle lorsque l'on arrive à des voiliers de **30** m pour lesquels les mâts en métal nécessitent des fabrications spéciales.

Cet équilibre de prix peut même intervenir à partir d'une vingtaine de mètres si l'on considère le gain obtenu sur le poids total du navire. Par ailleurs, si les caractéristiques mécaniques des alliages sont bien connues et restent dans des tolérances étroites, il en va tout autrement pour le composite dont les caractéristiques sont essentiellement fonction de son mode de réalisation et de la qualité de sa mise en œuvre. Entre un moulage « humide » par imprégnation à la main de renforts secs et polymérisation à température ambiante et un moulage de renforts pré-imprégnés sous vide avec polymérisation en four ou autoclave à température élevée et contrôlée, il est certain que les résultats seront extrêmement différents.

Lorsque l'on décidera d'adopter un mât en composite, il sera donc bon de s'enquérir de la méthode de fabrication utilisée et de la qualification du fabricant. Leur nombre étant relativement restreint, cela n'est pas trop difficile.

Enfin, à la fois avantage et risque, le composite permet toutes les variations d'épaisseurs et de formes, d'où une parfaite adaptation à l'évolution des contraintes et à la répartition des efforts locaux aux points de fixation des ancrages du haubanage, des barres de flèche et des différentes pièces

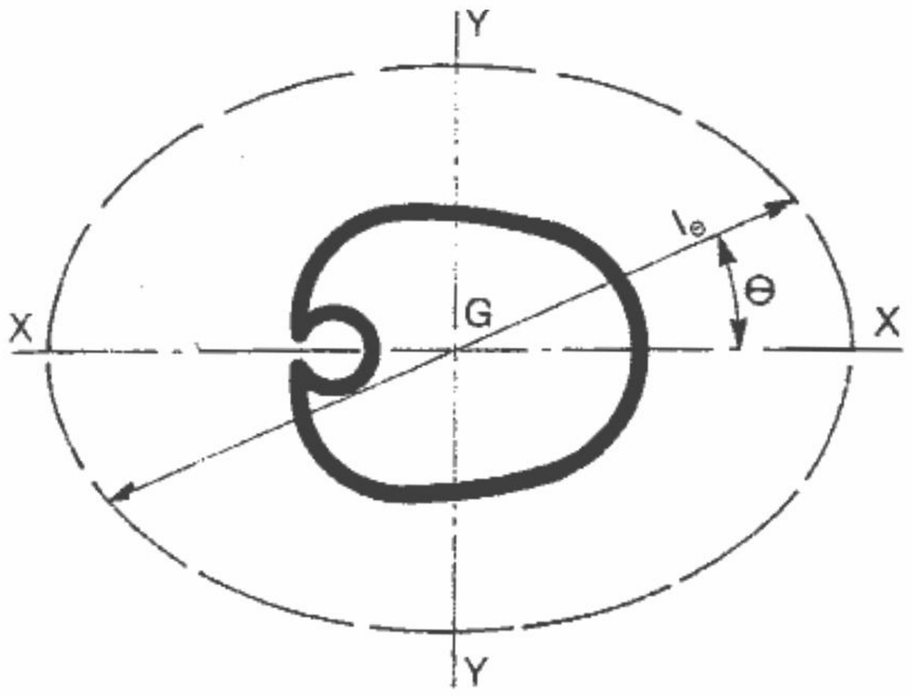


Fig. 6-27 • Connaissant les moments d'inertie d'une section I_X et I_Y, il est possible de connaître le moment d'inertie I_θ pour n'importe quel axe incliné de l'angle θ, il suffit pour cela de tracer l'ellipse ayant pour axes les valeurs de I_X et I_Y.

d'accastillage, le risque résidant dans une mauvaise évaluation de ces efforts ou un mauvais dessin de ces fixations.

Dans les grandes tailles, le problème du flambage local qui se présente alors sera résolu par l'adoption d'une composition sandwich de la paroi.

Les moments d'inertie d'un mât étant définis, il reste une infinité de dimensions possibles selon l'épaisseur que l'on donne à la paroi. Néanmoins, la section du profil — donc son poids — croissant comme le carré de ses dimensions (alors que les moments d'inertie croissent à la puissance quatre), plus les dimensions extérieures sont grandes, plus l'épaisseur doit être réduite pour conserver la même section, et le flambage local des parois devient rapidement critique.

Pour la même raison, un matériau à haute résistance en compression permettant de réduire la section du profil ne pourra pas, la plupart du temps, être utilisé au maximum de ses possibilités.

Dans le TOME 1, nous avons étudié la forme des sections sur le plan aérodynamique. Du point de vue mécanique, il ne faut pas oublier que la valeur des moments d'inertie selon différents axes de la section suit une courbe elliptique dont les axes ont pour longueur les moments d'inertie longitudinal et transversal (FIGURE 6-27).

Par ailleurs, le cintrage du mât se produit dans une direction intermédiaire, et variable sur sa hauteur, entre ces deux axes.

Lorsque l'on désirera modifier les caractéristiques de flexion d'un mât par l'adjonction de renforts internes, il ne faudra pas oublier que leur emplacement ne sera pas quelconque, on privilégiera l'axe sur lequel ils seront situés. Et lorsqu'on voudra raidir simultanément les deux directions, plutôt que de placer des renforts sur les deux axes principaux, on les situera sur les axes diagonaux.

Des renforts locaux internes peuvent être également prévus pour la fixation des attaches de haubans.

Dans le dessin des sections, on évitera toute partie rectiligne dont la résistance au flambage local constituerait un point faible. De ce point de vue, une section elliptique représente le meilleur compromis. Pour la même raison, sur une section ouverte (pour le passage d'une ralingue ou pour une voile à enrouleur), la paroi interne sera toujours courbe (FIGURE 6-28).

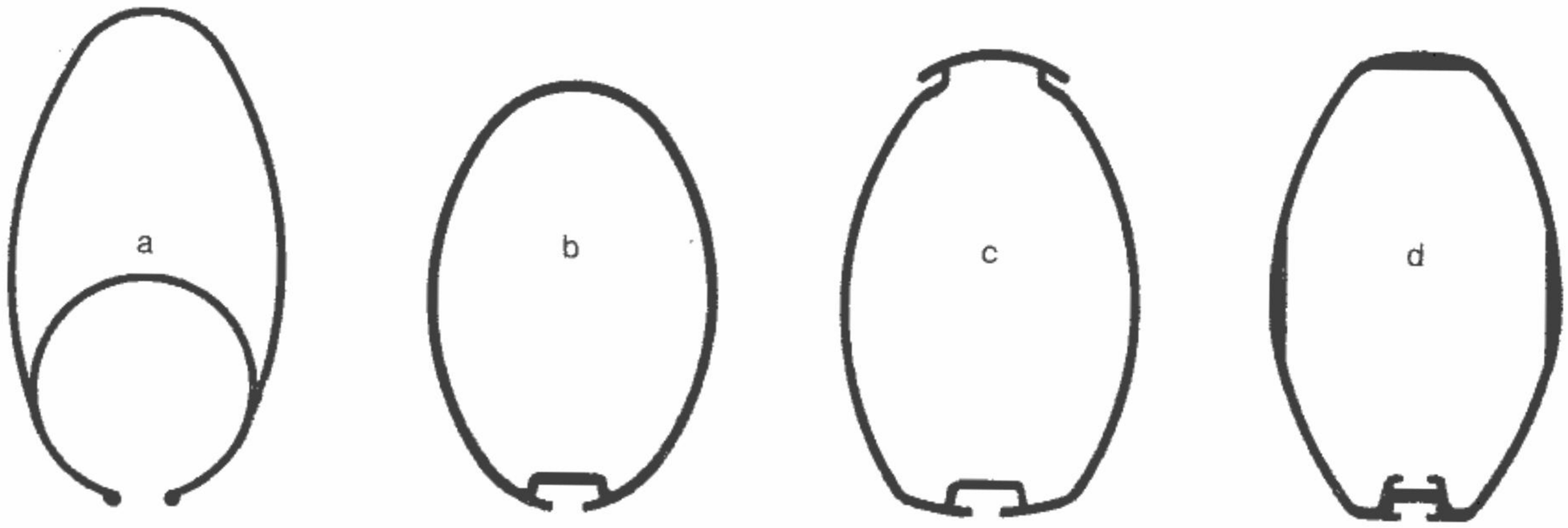


Fig. 6-28 • Différents exemples de sections de mâts :
a - section Francespar pour voile à enrouleur;
b - section Francespar elliptique classique;
c - section Z-Spar avec rail de tangon intégré;
d - section Maréchal à rapport de moments d'inertie élevé et renfort sur les axes; le rail intérieur est destiné à recevoir une gaine plastique pour les câbles électriques.

Il n'est pas toujours possible de réaliser un mât d'une seule longueur, généralement pour des raisons de transport ou de manutention, mais aussi parce que les fabricants sont limités par la longueur des fours de traitement thermique ou des cuves d'anodisation. Dans ce cas, le raccord des tronçons ne doit pas s'effectuer n'importe où sur le profil. Il faut rechercher les points où le moment fléchissant est nul et qui correspondent aux points d'inflexion de la déformée du mât. Ils se situent aux environs du quart du panneau au-dessus et au-dessous des barres de flèche. En aucun cas, il ne faudra placer les raccords à hauteur de celles-ci, comme on le voit trop souvent. Le raccord se fera sur un manchon collé et rivé.

Le joint entre les deux extrémités doit être parfait, sans aucun faux appui, de façon à transmettre uniformément les efforts de compression sans introduire de moment de flexion parasite. Afin de ne pas créer de point dur, le manchon intérieur, constitué d'une tôle roulée de même épaisseur que la paroi, sera découpé en créneaux pointus (FIGURE **6-29**).

L'alliage A-SGM ayant subi un traitement thermique, toute opération de soudure aura pour effet de réduire ses caractéristiques mécaniques. On s'interdira donc toute soudure dans un plan perpendiculaire à l'axe du mât, sauf bien sûr, aux extrémités où il n'existe que des contraintes de compression ou de cisaillement pour lesquelles la section est largement surabondante. En particulier, on rejettera les montages de barres de flèche emmanchées sur un plat traversant le mât et soudé aux parois.

Les rétreints en tête de mât nécessitent une soudure sur l'axe de la paroi antérieure. Celle-ci est admissible à condition que la soudure soit effectuée avec le maximum de précautions pour réduire le plus possible la largeur affectée.

Ces rétreints sont intéressants non seulement sur le plan de l'allégement de l'extrémité supérieure du mât, mais aussi pour réduire la largeur présentée au vent et les effets néfastes qui en résultent pour la grand-voile. Le rétreint commencera à mi-hauteur du dernier panneau pour un gréement en tête et les dimensions extérieures ne seront pas réduites de plus de moitié. La courbe des réductions de dimensions sera en forme de parabole. Pour un gréement **7/8**, le rétreint pourra partir à mi-hauteur du dernier panneau sous le capelage de l'étai de foc, mais il n'est pas possible de donner une proportion et une forme de réduction de dimensions précises, car elles dépendent de la coupe de la voile. C'est pourquoi il est pratiquement toujours nécessaire de prévoir un guignol dont l'ouverture des barres devrait être réglable pour pouvoir absorber le cintrage du mât dans les deux plans.

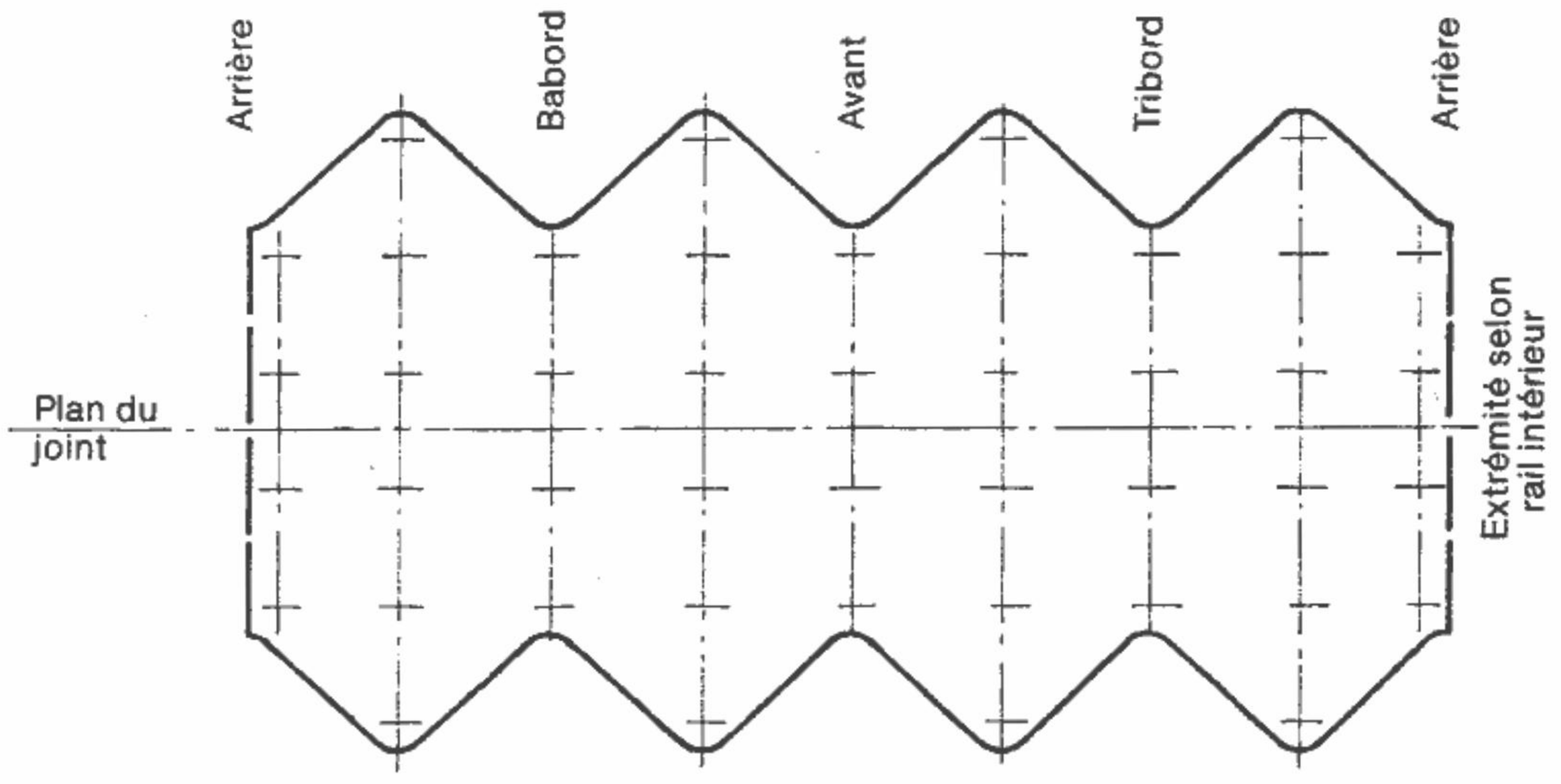


Fig. 6-29 • Collier de liaison d'éléments de mât. La hauteur est égale au moins à la moitié du périmètre intérieur du mât. Les « cornes » sont placées sur les axes diagonaux de la section. La fixation est assurée par collage époxyde et rivets Pop contre-percés avec le mât. Le joint, placé sur la face arrière, vient buter sur le rail de guindant; il est bon de rapporter un guide en U sur l'extérieur de ce rail pour éviter tout risque de désalignement qui provoquerait le blocage des coulisseaux.

E ■ ACCESSOIRES ET ÉQUIPEMENTS

Il est rare que l'on soit amené à dessiner les ferrures et accessoires divers du mât. Les fabricants sérieux proposent une gamme qui permet de réaliser à peu près toutes les configurations possibles de gréement. Il sera néanmoins important d'étudier ces équipements et de les choisir en fonction d'un certain nombre de critères.

Il n'est bien sûr, pas possible de passer en revue ici toutes les solutions proposées et l'on devra se procurer les catalogues. Malheureusement, ceux-ci sont pour la plupart d'une rare pauvreté, surtout quant à la description des équipements. Encore heureux quand on y trouve tous les renseignements indispensables au choix du profil : dimensions, épaisseur, surface de la section, moments d'inertie et position du centre de gravité.

1 TÊTE DE MÂT

Une des premières qualités d'une tête de mât doit être la légèreté puisqu'elle est placée à un endroit particulièrement défavorable, non seulement pour la stabilité, mais surtout pour l'amortissement du roulis et du tangage.

Elle sera donc la plupart du temps réalisée en alliage léger et soudée à l'extrémité du mât.

La potence sur laquelle est fixé le pataras doit présenter une rigidité suffisante, aussi bien verticalement que transversalement. La portée de l'axe de fixation doit résister au matage. Pour cela, il est souvent nécessaire de doubler l'épaisseur par une rondelle ou un canon soudés et, dans les plus grandes tailles, un axe creux de fort diamètre permettra d'allier légèreté et grande surface d'appui. Les mêmes considérations s'appliquent à la fixation de l'étai mais, pour celle-ci, il faudra tenir compte en plus de la variation de son angle initial qui, comme nous l'avons vu, peut atteindre, voire dépasser dans certains cas une dizaine de degrés en moins dans le sens longitudinal et autant de chaque côté. Une double articulation est donc indispensable.

Je ne saurais trop insister sur l'importance du diamètre des réas de drisses. Ceux-ci ne sont jamais assez grands et pratiquement tous les problèmes de rupture prématurée de drisses sont dus à des réas trop petits. Ce fut le cas en particulier de *Club Méditerranée* *. Des drisses tout textile comme on en utilise souvent sur les voiliers de croisière, jusqu'à une douzaine de mètres, s'accommodent de réas plus petits mais plus larges. En revanche, les drisses en Kevlar demandent des réas au moins aussi grands que pour l'acier.

* Se reporter sur ce point à *Voiles et Gréements* (EMOM).

De tels réas nécessitent, pour ne pas être trop lourds, un allégement parfaitement étudié.

La rigidité transversale doit être préservée pour qu'ils ne puissent se voiler. Le moyeu doit être plus large que la jante de quelques dixièmes de millimètre afin que celle-ci ne porte pas sur les joues de la cage, ce qui freinerait sa rotation.

Les réas en alliage léger seront munis d'une bague en polyacétale, ou matériau équivalent, de préférence chargé d'un agent favorisant le glissement, graphite ou molybdène, afin de demander le minimum d'entretien. Dans les grandes dimensions, des roulements à galets ou à billes sont nécessaires. Dans tous les cas, la dépose des réas doit pouvoir s'effectuer de l'extérieur, sans démontage d'aucun autre élément. Le réa de foc, par exemple, doit pouvoir sortir sans être gêné par l'étai. Les galets ou les billes des roulements doivent être retenus dans des cages. Il ne faut pas oublier que ces démontages seront souvent effectués mât en place.

Les drisses doivent également pouvoir être passées sans démonter les réas, ce qui implique une largeur de cage au moins égale à celle du cordage.

Le rail ou la gorge de ralingue de grand-voile devront toujours être munis d'une butée supérieure, même si le voilier n'est pas destiné à des courses. Il faut, en effet, toujours respecter une hauteur minimum entre l'axe du réa et le dessus de la têtière pour que celle-ci puisse s'orienter facilement, sans en être empêchée par une longueur libre de drisse trop courte.

Cette hauteur doit être d'au moins 6 fois la distance entre l'arrière du mât et l'œil du point de drisse.

Les lèvres du réa et de la cage de la drisse de foc doivent permettre une orientation autour de son axe statique dans un cône de 10° de demi-angle au sommet, sans aucun ragage.

Les drisses de spinnaker doivent pouvoir s'orienter au moins dans un quart de sphère délimité par un plan horizontal perpendiculaire au mât et le plan transversal. La solution la plus simple consiste à monter une poulie à émerillon sur un œil fixé à l'extrémité d'une petite potence.

L'œil sera calé à **30°** de la verticale et la potence sera décalée sur le côté de façon que la poulie ne vienne pas en conflit avec l'étai (FIGURE **6-30**).

Sur les voiliers de course, la potence sera double ainsi que tout l'équipement de drisse de spinnaker afin de permettre le changement de voile.

Lorsqu'on désire des drisses intérieures, ce montage est utilisable en faisant pénétrer celles-ci dans le mât par une boutonnière placée à une certaine distance sous la tête. La boutonnière doit être garnie de lèvres arrondies sur son pourtour, ou munie de réas pour réduire le ragage que l'on ne peut cependant pas éviter totalement. D'autre part, la boutonnière affaiblit la section du mât à un endroit particulière-

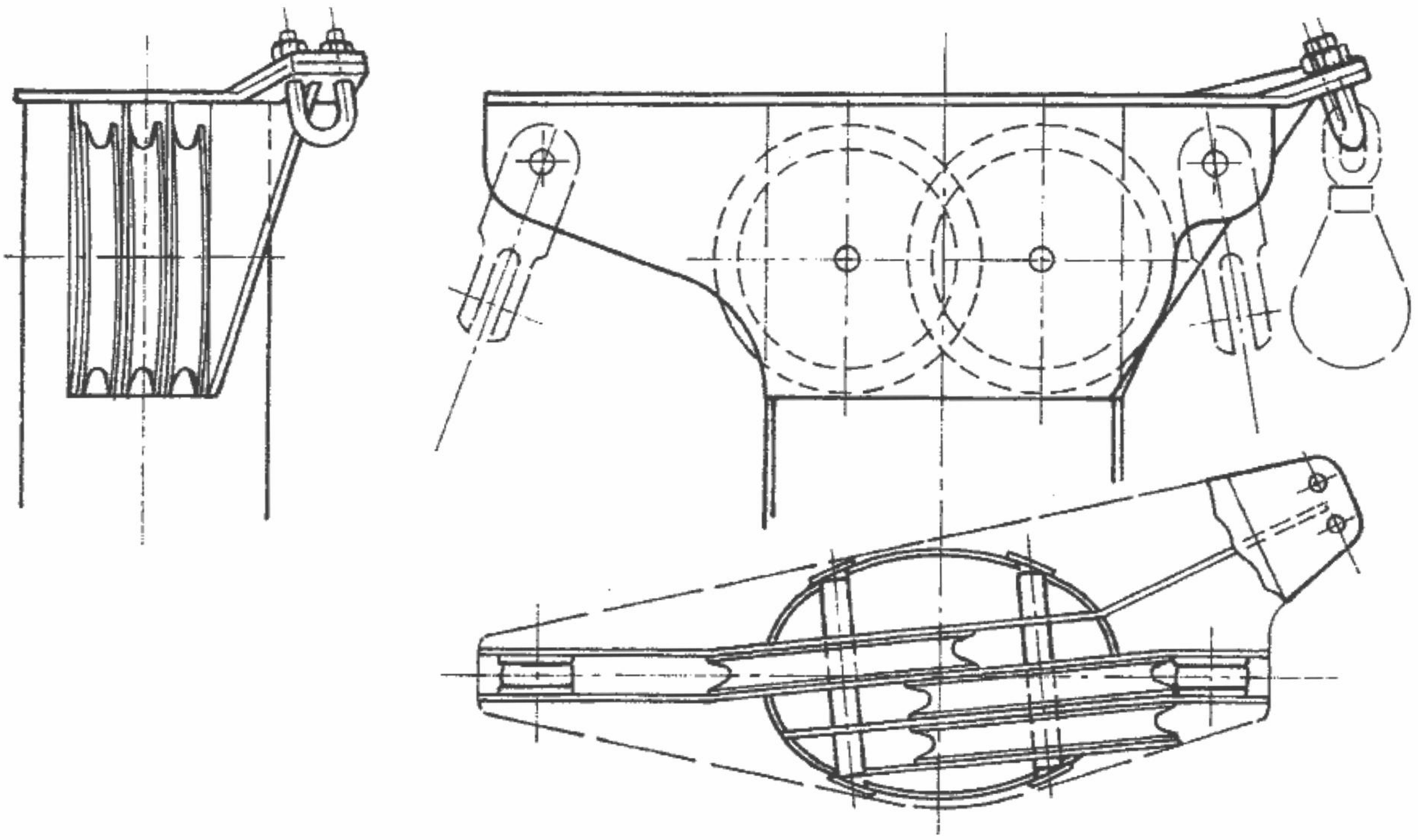


Fig. 6-30 • Cette disposition de tête de mât, en tôle soudée, de hauteur très réduite, permet néanmoins de placer de grands réas, avec des sorties de drisses principales dans l'axe. Seule la drisse de foc auxiliaire est décentrée. On notera que l'articulation de l'étai n'est qu'à un angle de 10°. Le seul inconvénient réside dans le fait que les réas ne peuvent être démontés que par la face opposée à la sortie de drisse. Les axes sont retenus par des plaquettes vissées. L'épaisseur de la tôle est doublée, au passage des axes de l'étai et du pataras, par des rondelles intérieures soudées. Une contreplaque soudée double également l'extrémité de la potence.

ment critique. Si l'on n'est pas limité par des problèmes de jauge, on peut utiliser, pour les drisses de spinnaker, un réa monté dans une cage pivotant autour d'un moyeu vertical creux dans lequel passe le retour de la drisse. Ce montage, placé au-dessus de l'étai, permet un débattement latéral de 180° avec une seule cage mais beaucoup plus limité avec deux cages. Il présente, de plus, l'inconvénient de rallonger le mât. Il en est de même avec les sorties de drisses de spinnaker comportant des galets verticaux. A vrai dire, personne n'a encore trouvé de solution satisfaisante à ce problème.

2 FIXATION DES HAUBANS

Le système classique de cadènes fixées sur les parois est un héritage des mâts en bois. Il reste parfaitement valable tant que l'on ne recherche pas des qualités aérodynamiques optimales. Il doit répondre cependant à un certain nombre de contraintes.

La partie libre des cadènes doit être assez longue pour laisser la place à l'extrémité de l'axe et au montage de sa goupille. Son jeu avec la paroi doit permettre une réduction de l'angle initial d'au moins 2° lorsque le mât se cintre.

La cadène peut être simple lorsque le hauban est muni d'une chape, ou double dans le cas d'un œil, solution la plus fréquente.

Dans les deux cas, on doit vérifier le matage et il sera souvent nécessaire de doubler l'épaisseur par une rondelle ou un canon soudés. Lorsque la cadène est double, le cambrage des deux pattes doit être symétrique pour ne pas créer de porte-à-faux. La cadène est généralement reprise sur un boulon traversant le mât. Il est indispensable que ce boulon soit muni d'une entretoise pour solidariser les deux parois, réduisant ainsi les contraintes parasites (FIGURE 6-31). Ici encore, il faut vérifier le matage, non seulement entre la cadène et l'axe, mais surtout entre l'axe et la paroi du mât. Un axe creux ou une douille de gros diamètre permettent généralement de résoudre ce problème au niveau des cadènes, mais un doublage en acier inoxydable doit être rivé sur la paroi pour répartir l'effort et supporter l'essentiel du matage. En aucun cas, les pièces ne doivent porter sur une partie filetée de l'axe et les écrous doivent toujours être munis d'un système d'arrêt.

Pour diminuer les turbulences aérodynamiques sur le mât, mais souvent aussi par souci de réduction du prix de revient, les fabricants ont adopté des systèmes d'accrochage de

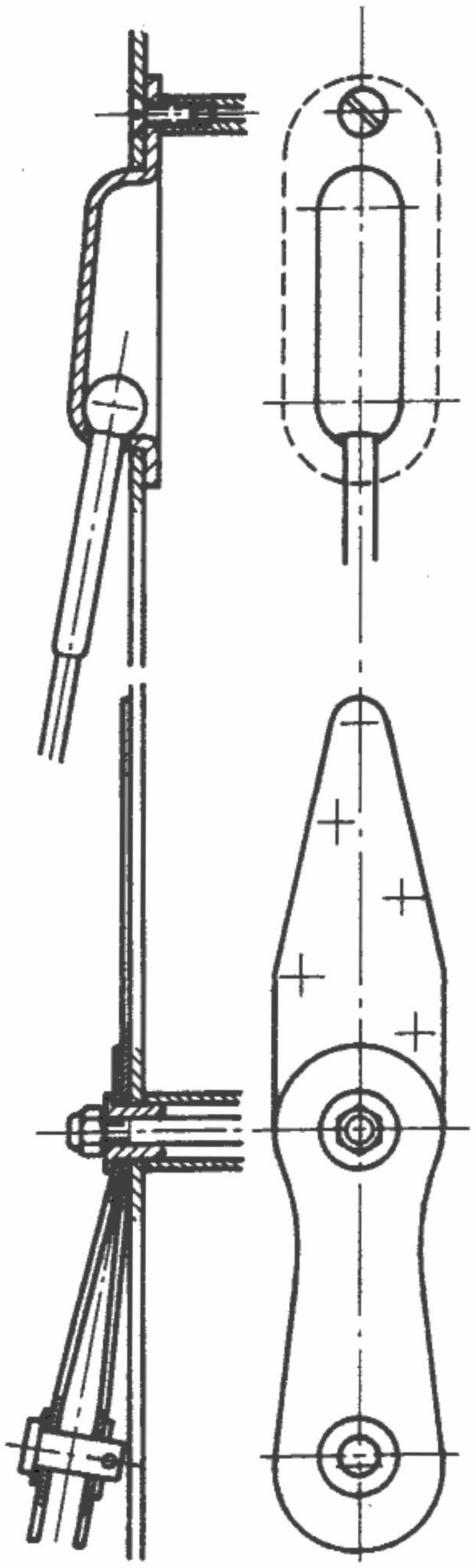


Fig. 6-31 • Deux systèmes d'attache de hauban. En haut, un embout à sphère est retenu par une coupelle en acier inoxydable emboutie. L'articulation est excellente, ainsi que la portée sur le mât. La vis de retenue est vissée dans l'entretoise transférant l'effort latéral aux deux parois. Lorsque deux haubans doivent se monter au même endroit, il faudra décaler les attaches en hauteur d'une distance égale à au moins trois fois la longueur de l'ouverture. En dessous, cadène classique en forme de chape. On notera la douille augmentant le diamètre de la portée dans le mât et sur laquelle vient se centrer l'entretoise, et le décalage des trous de fixation de la latte de répartition.

haubans sur la paroi. Ces systèmes n'ont rien de fondamentalement mauvais à condition de respecter un certain nombre de règles.

L'accrochage ne doit jamais s'effectuer directement sur la paroi en alliage léger, mais sur une pièce de renfort, généralement en acier inoxydable, capable de supporter les contraintes de matage. Cette pièce doit porter sur l'épaisseur de la paroi du mât pour lui transmettre les efforts de compression, les seuls rivets ou vis de fixation ne pouvant assurer cette fonction. Néanmoins, l'ouverture dans la paroi doit être aussi petite que possible car elle se trouve toujours à un niveau de fort moment fléchissant. Surtout, le système d'accrochage constitué de l'embout serti sur le câble et de sa pièce support doit permettre un débattement sous tension de plusieurs degrés dans toutes les directions. Ceci condamne les embouts en T dont la barre n'est qu'un simple cylindre.

La portée doit toujours être sphérique. Afin d'aligner le câble avec sa portée, l'embout est parfois contre-coudé, il faudra veiller à ce que le jeu entre la paroi et le talon soit suffisant pour qu'en aucun cas celui-ci ne vienne s'y appuyer, sinon on peut être assuré de provoquer soit une rupture du câble à l'entrée dans l'embout, soit de ce dernier à hauteur du talon.

De plus, la section de la partie contre-coudée et son dessin doivent être tels qu'elle ne puisse se déformer sous la charge. C'est sans aucun doute la combinaison de ces deux défauts qui a provoqué le démâtage du trimaran d'Olivier DE KERSAUZON, *Jacques Ribourel*. Enfin, est-il nécessaire de le préciser, un système de sécurité doit empêcher l'embout d'échapper de son logement.

Les attaches des haubans étant situées, en général, à proximité de la tête ou des barres de flèche, celles-ci assurent la liaison entre les parois. S'il n'en est pas ainsi, un tirant doit relier les deux pièces opposées.

3 BARRES DE FLÈCHE

Elles sont aujourd'hui réalisées, la plupart du temps, dans des tubes profilés. Il est malheureux que les fabricants n'en profitent pas pour les caler à un angle d'incidence négatif d'une dizaine de degrés qui réduirait beaucoup leur traînée. Tous les grands architectes classiques savaient cela.

Dans le sens vertical, la barre doit être calée selon la bissectrice de l'angle du hauban à son passage sur l'extrémité afin d'éviter toute contrainte parasite. Sa fixation doit cependant posséder une certaine souplesse pour tenir compte des petites erreurs qui peuvent se produire au montage des haubans, des variations dues à leur allongement lorsque le mât travaille et du cintrage de celui-ci.

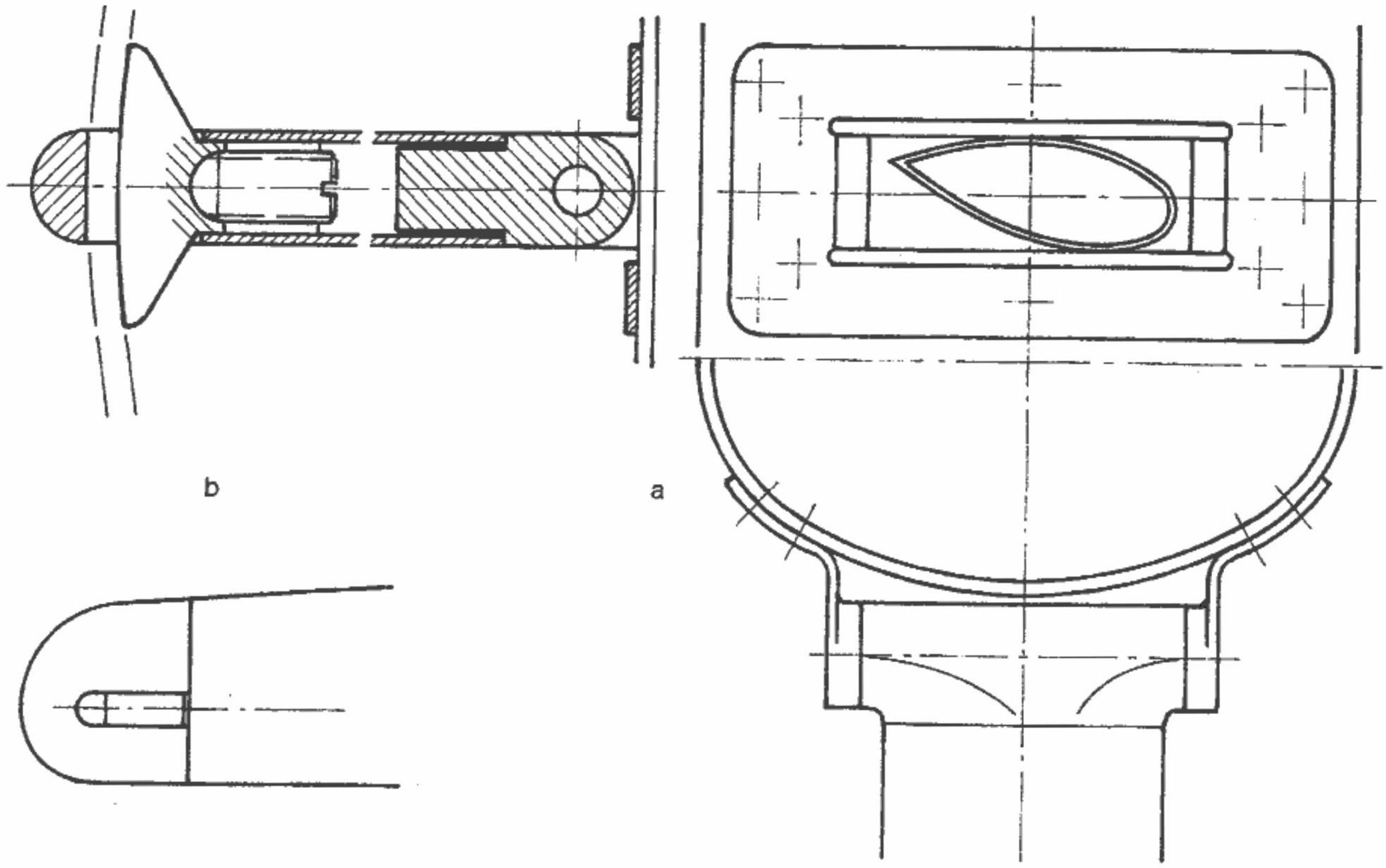


Fig. 6-32 • Détails de montage de barres de flèche. A gauche, embout avec serrage du câble par une cale intérieure. Pour les câbles jusqu'à 6 mm, on peut également utiliser un étrier ou un crochet en fil passant par l'extérieur, à condition que la portée du câble dans l'embout soit au rayon convenable, compte tenu de l'angle du hauban et de la largeur de l'embout. A droite, fixation articulée sur le mât. La chape de l'articulation est constituée d'une plaque d'acier découpée et renforcée aux portées de l'axe. Compte tenu de l'enveloppement important de la section du mât, une entretoise n'est pas nécessaire. On peut également, sur les gros profils, utiliser des paliers vissés sur des axes traversant avec entretoises. A noter, l'incidence négative de la barre profilée.

Dans le sens longitudinal, les efforts sur la fixation peuvent être très élevés lorsque le mât se cintre vers l'avant. Il est donc bon que cette fixation soit assurée en deux points aussi éloignés que possible, en avant et en arrière de la barre, plutôt qu'au centre, pour réduire les contraintes sur le collier rivé au mât, une certaine souplesse est néanmoins favorable. Ce collier sera assez développé pour répartir l'effort de compression sur une grande surface et, si besoin est, les deux ferrures opposées seront reliées par un tirant avec entretoise. Un bon système consiste à articuler la fixation sur un axe horizontal dont les paliers sont solidaires du collier, tandis que l'emmanchement de la pièce centrale dans la barre de flèche se fait avec interposition d'une feuille de néoprène (FIGURE **6-32 a**). Cependant, pour les voiliers jusqu'à une huitaine de mètres, une fixation sur un axe traversant le mât est admissible, à condition que celui-ci réponde aux mêmes critères que l'axe de fixation des cadènes (entretoise et répartition de l'effort). Ils peuvent d'ailleurs être confondus.

La barre de flèche travaillant au flambage, sa section peut être réduite à partir du milieu vers l'extrémité. Cependant les fabricants utilisent parfois des sections plus longues que nécessaire pour avoir une grande largeur de fixation sur le mât. Dans ce cas, le rétreint se fait sur toute la longueur de la barre.

L'extrémité comporte un embout dans lequel le câble est bloqué à son passage. En aucun cas, il ne doit porter sur l'extrémité du tube et, plutôt qu'un blocage par une vis extérieure, il est préférable que la vis soit intérieure à l'embout et appuie sur un sabot recevant le câble et permettant d'arrondir suffisamment l'angle de celui-ci (FIGURE **6-32 b**).

Ce montage est impératif pour les haubans en barre. Le sabot aura suffisamment de jeu pour laisser le hauban s'orienter à sa guise et l'extrémité de la vis de serrage sera sphérique.

On évitera bien sûr tout système à base de pièces soudées au tube, en particulier ceux utilisant un large méplat

horizontal traversant le mât et sur les extrémités duquel les barres sont emmanchées. Avec un tel système, la résistance latérale du mât est souvent réduite de plus de **30 %** par la chute des caractéristiques du métal.

Avec un gréement à plusieurs étages de barres de flèche, doit-on faire descendre tous les galhaubans jusqu'au pont ou non ? Sans aucun doute oui.

On y gagne d'abord en facilité de réglage, il n'est jamais très aisé d'aller régler un ridoir à l'extrémité d'une barre de flèche. On y gagne aussi sur le fardage car deux câbles plus petits en tandem auront moins de fardage qu'un câble plus gros *. Il faudra simplement veiller à ce qu'ils soient collés l'un derrière l'autre.

Ceci implique que tous les câbles passent par les extrémités des barres de flèche, bien que seul le galhauban correspondant y sera bloqué. C'est le seul inconvénient du système lorsque le mât se cintre, car alors la barre de flèche est soumise à des contraintes longitudinales dont la répercussion sur sa fixation peut être très élevée. Encore n'est-ce un inconvénient que sur ce plan car, pour la tenue du mât, cela est très favorable puisque les points d'appui ainsi constitués dans le plan longitudinal permettent de réduire le moment d'inertie du mât dans ce sens.

On ne perd pas en poids puisque le câble unique devrait avoir une section égale à la somme des deux autres et l'on n'aura pas le poids de la ferrure articulée à placer à l'extrémité de la barre de flèche. Quant au ridoir, son poids sera mieux placé en bas.

Si, néanmoins, pour des raisons diverses, on préférait la solution du galhauban unique, les articulations à l'extrémité des barres de flèche devraient être étudiées pour permettre une certaine liberté des câbles, non seulement sur le plan transversal, mais aussi dans le sens longitudinal.

4 PIED DE MÂT, SORTIES DE DRISSES ET DIVERS

On attache souvent peu d'attention au pied de mât. Pourtant, celui-ci a au moins deux fonctions importantes, sa tenue dans le plan horizontal et la définition du point d'appui par rapport au centre de gravité de la section. Ce dernier point appelle quelques explications.

Si le pied de mât et sa platine sont plats, il y a peu de chance pour qu'ils soient parallèles. La moindre différence de quête, et le pied portera sur l'avant ou l'arrière, introduisant un moment de flexion et donc un cintrage dans la partie inférieure du mât.

* Voir TOME 1, PAGE 158

Pour un mât sur le pont, si l'appui est sur l'avant, ce moment pourra équilibrer celui de la poussée de la bôme, il n'est donc pas défavorable.

Il n'en sera pas de même si l'appui se fait sur l'arrière, ce qui, malheureusement, est le cas le plus fréquent ; c'est l'inverse pour un mât sur la quille. Il faut alors placer, sous la platine, une cale compensant l'angle de la quête.

On peut également, comme sur certains 12 m J.I., interposer entre les deux pièces une plaque de caoutchouc très dure répartissant la pression. Mais le mieux est encore de donner au pied de mât une forme arrondie avec un centre de courbure placé vers l'avant du profil (ou l'arrière pour un mât sur quille), on obtiendra ainsi un décalage selon la quête qui sera plus progressif.

Il est indispensable que le mât soit emmanché dans, ou sur la platine, sur une hauteur suffisante pour éviter tout risque d'échappement comme nous avons vu que cela était vraisemblablement arrivé lors du premier démâtage de *Pen Duick VI*.

Cependant, si le mât est posé sur le pont, il ne faut pas assurer cette liaison par un axe traversant les deux pièces car, en cas de démâtage, l'arrachement de la platine pourrait provoquer une voie d'eau. Cette platine doit être boulonnée, à travers le pont, sur la platine de l'épontille et non simplement « fixée » par quatre vis *Parker*, comme on le voit trop souvent.

Les ouvertures dont sont pourvus les mâts pour le passage des diverses manœuvres sont autant d'entrées offertes à la pluie. Il est donc indispensable qu'un trou d'évacuation soit prévu à la base.

Si le mât est posé sur le pont, le trou sera percé dans le pied. S'il est posé sur la quille, un autre trou sera percé au-dessus de l'étambrai, sur la face avant, et un bouchon de mousse de polystyrène sera enfoncé en dessous.

L'étanchéité de l'étambrai d'un mât emplanté est assurée par une braie de mât, chemise de toile caoutchoutée tenue sur le mât et sur un bourrelet d'étambrai par des colliers métalliques. Il ne faut pas oublier, bien sûr, d'obturer les gorges et rails.

Le mât doit être bloqué dans l'étambrai par des cales en caoutchouc dur placées devant et derrière et dont le secteur couvert sera, pour chacune, égal environ au quart de la circonférence du profil.

Deux autres nuisances des mâts en alliage léger touchent au confort : le bruit des drisses et câbles électriques intérieurs et les échanges thermiques.

Ce dernier inconvénient peut être réduit en enrobant la partie du mât située sous le pont d'un revêtement isolant, comme on en utilise pour les tuyauteries. Collé à l'intérieur d'une manche en toile fermée par une fermeture à glissière, il sera facilement amovible pour le démâtage.

Le choc des drisses est beaucoup plus difficile à éliminer. On peut cependant utiliser la méthode suivante. On découpe des plaques de mousse rigide au profil intérieur de la section, que l'on perce pour les enfiler et les coller sur des tubes en PVC rigide, aussi légers que possible. Le tout étant ensuite glissé à l'intérieur du mât, avant la pose des ferrures. On peut se contenter de deux conduits seulement, s'ils sont assez gros pour laisser passer plusieurs drisses. Leurs extrémités seront largement évasées et leur position sera calculée pour être en ligne directe avec le passage des drisses. Les câbles électriques seront simplement coincés dans des encoches ménagées sur le pourtour des cales. L'espacement de celles-ci sera de **1,50** m à **2** m et les sorties de câbles seront munies de passe-fil.

Les sorties de drisses peuvent être situées soit en pied de mât, soit à hauteur. Cette solution est cependant très dangereuse, car le mât se trouve affaibli à un endroit particulièrement vulnérable.

A une certaine époque, beaucoup de mâts d'Arpège périssaient par fort vent pour cette raison. Si cette solution est néanmoins adoptée, le passage à travers la paroi sera renforcé, et la drisse protégée du ragage par des lèvres arrondies ou une cage à deux réas en tandem. Les ouvertures pratiquées dans le mât se termineront par des arrondis et elles seront décalées en hauteur d'au moins trois fois leur longueur, de façon à n'avoir jamais deux ouvertures dans le même plan.

L'alignement avec les winches est toujours difficile à assurer correctement. Les platines sur lesquelles ils sont fixés ne doivent pas être parallèles au mât, mais orientées de telle sorte que l'axe du winch fasse un angle d'environ **100°** avec le cordage tourné sur la base de la poupée. De même, un taquet ne doit jamais être placé dans l'axe de tire de la drisse qui vient s'y amarrer, mais faire avec elle un angle de **15** à **20°** dans son plan.

Les platines de winches doivent être solidement fixées, si possible avec un rang de rivets dans l'axe, en plus de ceux des lèvres d'appui. Les écrous des boulons de fixation des winches doivent néanmoins rester accessibles à une clé de serrage.

Les enrouleurs, peu utilisés de nos jours, doivent être placés suffisamment loin du réa de sortie de drisse pour que l'angle de celle-ci ne varie pas de plus de **3°** entre les deux extrémités du tambour.

5 ARTICULATION DE BÔME

La plupart des articulations de bôme sont montées sur un chariot, afin de permettre un étarquage de la voile par un palan d'amure. Ces chariots coulissent, le plus souvent assez mal, dans la gorge ou le rail utilisés pour la ralingue, ou dans un rail rapporté. Pour améliorer le glissement, il faudrait que ces chariots soient munis de garnitures en Téflon ou en polyacétate chargé, mais les gorges et les rails femelles, de section trop faible, ne le permettent pas. Cela devient cependant possible lorsque le rail ne sert que de guidage et que le chariot porte, de part et d'autre de celui-ci, directement sur le mât. Cette solution est d'ailleurs de loin la meilleure pour équilibrer le porte-à-faux important de la poussée de la bôme aux allures portantes.

Les deux axes, vertical et transversal, doivent être aussi proches que possible l'un de l'autre et de la face arrière du mât afin que la position de la bôme ait le minimum d'influence sur la tension des ralingues. Néanmoins, le débattement de la bôme doit pouvoir atteindre **90°** de chaque bord, **20** à **30°** vers le haut et vers le bas.

La manille de fixation du point d'amure et les crocs des points de ris seront montés sur l'axe vertical et articulés dans le plan vertical.

6 ÉQUIPEMENTS DE BÔME

Ceux-ci se résument essentiellement aux attaches d'écoute et de hale-bas, et au dispositif de prise de ris.

Les premiers doivent être suffisamment résistants pour ne pas se déformer, tout en laissant à la poulie qui y est fixée une grande liberté de débattement latéral aux allures portantes. Il est préférable que l'étrier soit articulé sur un axe transversal. Leur fixation doit être aussi répartie que possible, en particulier pour le hale-bas.

Des points d'ancrage supplémentaires doivent être prévus pour les retenues utilisées au vent arrière.

Le hale-bas peut être constitué d'un vérin, hydraulique ou mécanique, ce qui permet de supprimer la balancine ou, plus généralement, d'un palan.

Son point de fixation sera toujours sur le mât ou sa platine de pied. S'il est fixé sur le pont, ce qui est souvent le cas pour un mât posé sur la quille, il est impératif qu'un tirant intérieur relie le pont à la platine de pied. Ceci est valable d'ailleurs pour tous les voiliers à mât posé sur la quille et qui ne disposent pas d'une cloison à proximité immédiate.

Un palan de hale-bas sera toujours aussi court que possible. Une pantoire en câble gainé le reliera à la bôme. Il sera toujours préférable de réduire le nombre de brins du palan au bénéfice d'un winch. La rapidité de manœuvre sera peut-être un peu moins grande, mais le rendement plus élevé.

Le point d'attache inférieur du hale-bas doit laisser à celui-ci toute la liberté d'orientation nécessaire. On voit trop souvent des manilles ou des poulies porter à faux sur la ferrure de pied de mât.

Dans le cas d'un hale-bas rigide, en particulier, le point d'attache inférieur doit être une articulation semblable à celle de la bôme, leurs axes verticaux étant alignés.

Les mêmes considérations sur la longueur et le nombre de brins sont valables pour le palan de grande écoute.

Les bosses de ris, comme celle d'étarquage du point d'écoute, sont aujourd'hui presque toujours renvoyées, par l'intermédiaire de réas placés en bout de bôme et, par l'intérieur de celle-ci, vers des coinceurs à came placés en dessous de l'extrémité avant. Il faudra vérifier que la disposition des réas de sortie ne provoque pas une détente de la bosse lorsque l'on manœuvre les cames de blocage, ce qui est malheureusement souvent le cas.

A partir d'une surface de grand-voile d'une vingtaine de mètres carrés, on utilise un winch placé sous la bôme ou sur l'arrière du mât pour étarquer plus facilement. Dans le second cas, la platine du winch doit être écartée du mât pour laisser le passage du palan d'amure.

Le dormant des bosses de ris peut être fixé sur un œil placé sur le côté de la bôme. Si cet œil est monté sur un coulisseau réglable dans un rail, c'est encore mieux, car sa position est critique pour le réglage de la voile. Mais si la ralingue est équipée de coulisseaux, il suffira de nouer le dormant autour de la bôme, ce qui élimine des protubérances toujours dangereuses.

Pour l'étarquage du point d'écoute, qui demande de la précision et de la force, une première démultiplication pourra être obtenue en passant la bosse dans une poulie à émerillon attachée sur la voile, le dormant venant se fixer sur l'embout de la bôme. Avec des grands-voiles de plus de **40** m², la poulie sera montée sur un chariot à galets ou à billes, sur lequel sera manillé le point d'écoute.

Ne pas oublier que l'embout de bôme doit être pourvu d'un point de fixation pour la balancine.

7 TANGONS DE SPINNAKER

La première chose à définir sera le processus d'empannage qui déterminera le type d'embouts de tangon et de fixation sur le mât.

Pour les petits voiliers, on utilise généralement la méthode du tangon réversible. Les deux embouts sont identiques et il n'y a qu'un point d'attache sur le mât, soit un ou plusieurs œils fixes, décalés en hauteur, soit un œil ou une fourche articulée sur chariot.

Il faudra vérifier que le débattement est possible dans toute la portion de sphère délimitée par le pont et les haubans, sans que l'embout puisse se coincer, ce qui provoquerait immanquablement sa rupture. Du fait de la réversibilité, balancine et hale-bas doivent être attachés au milieu du tangon, mais ce n'est que sur les très petits voiliers (spinnaker inférieur à **30** m² environ) que des œils peuvent être montés directement sur le tube.

Au-delà, les efforts de flexion au largue, lorsque le tangon vient toucher l'étai, seraient trop élevés. Les manœuvres viendront s'attacher sur des pattes d'oie en câble fixées sur les embouts, de façon à ne faire travailler le tangon qu'en compression. Leur angle aux extrémités doit être d'au moins **15°** et on utilisera du câble gainé pour éviter de s'y prendre les cheveux. A partir de **80** m², il n'est plus possible d'envisager de décrocher le tangon du mât par vent ou mer forts. La réversibilité du tangon peut néanmoins conserver un intérêt pour la facilité de manœuvre lorsqu'on n'utilise qu'un seul tangon.

Dans ce cas, les embouts ont une forme extérieure conique permettant leur emboîtement, côté mât, dans une cloche fixée sur un chariot à billes, galets ou glissières assurant un coulissement sans effort lorsqu'il est en service.

Il ne faut pas oublier que la poussée du tangon, très élevée, se produit presque toujours avec un porte-à-faux important. La conception du chariot et du rail, sa fixation, doivent en tenir compte.

Le réglage en hauteur du chariot doit être assuré par un moyen disposant d'un blocage efficace.Balancine et hale-bas sont fixés sur l'extrémité du tangon, le second passant, en général, sur une poulie fixée sur le pont, en arrière de l'étai. L'efficacité est ainsi plus grande au largue, où la traction est la plus élevée.

Pour les spinnakers de très grande surface, ou lorsque le gréement ne permet pas l'empannage sur un seul tangon (bas-étai fixe, cotre...), on utilise deux tangons. Leur symétrie ne présente plus d'intérêt.

On utilise alors parfois, sur le chariot, un vit de mulet s'engageant dans l'embout du tangon où il est retenu par un verrou. Ce système est simple, léger, offre moins de protubérance sur le mât que la cloche, mais il peut être extrêmement dangereux pour la main de l'équipier qui doit l'orienter pour l'engager.

Le choix des embouts et du système de verrouillage des bras et écoutes est plus du ressort de l'utilisateur que de l'architecte.

Néanmoins, celui-ci devra veiller à sa solidité (en particulier sa fixation sur le tangon) et à sa facilité d'entretien (démontage). La commande passera par l'intérieur du tangon et ressortira, soit au milieu si le tangon est symétrique, soit vers le mât.

Avec des spinnakers dépassant **50** m², le jockey-pole servant à déborder le bras au largue devient indispensable. Sa fixation sur le mât doit être prévue.

F ■ LE PLAN DE GRÉEMENT

Ce plan doit fournir tous les éléments permettant de réaliser la mâture et le gréement dormant et courant du voilier.

Pour les mâts, il doit fournir les caractéristiques du profil minimum nécessaire : section, moments d'inertie, toutes les dimensions, la nomenclature et les emplacements des accessoires et équipements, les positions, longueurs et angles des barres de flèche. De même pour les bômes.

En retour, le fabricant de mât devrait fournir la position exacte des points d'attache du gréement de façon à permettre au gréeur de calculer exactement la longueur de ses câbles.

Pour le gréement dormant, on doit indiquer les résistances minimums des câbles (ou leur diamètre dans une marque donnée), leur type ainsi que le type d'embouts, de ridoirs, etc.

Pour le gréement courant, les diamètres et spécifications des cordages doivent être fournis, mais on laisse généralement au gréeur la responsabilité du calcul des longueurs. Ce qui réserve parfois des surprises !

1 GRÉEMENT TRANSVERSAL

La première option à définir dans le dessin du gréement transversal est le nombre d'étages de barres de flèche. Deux décisions préalables détermineront ce choix : d'une part le rapport entre l'écartement maximum des cadènes et la hauteur du mât, d'autre part l'angle de tire minimum des haubans.

La première sera dictée par le désir de rentrer les focs au maximum pour serrer le vent le plus possible. Il est certain que ce facteur sera plus important pour un voilier de compétition que pour un croiseur.

Comme base de départ, on pourra prendre une distance **e** à l'axe, égale à environ **7%** de **I*** pour le premier et à **9** à **10%** pour le second.

Pour la seconde décision, il faudra savoir que, pour des efforts transversaux égaux, plus l'angle sera réduit, plus la traction dans les haubans et la compression dans le mât seront élevées. Il en résultera une section, et donc un poids plus élevés, ainsi qu'une plus grande difficulté de réglage.

Pendant longtemps, on a considéré qu'un angle de **15°** était un minimum au-dessous duquel il n'était pas possible de descendre sans risque.

Aujourd'hui, sous l'influence de la compétition et des voiliers qui réalisent des voiles permettant des angles d'incidence de plus en plus faibles, on trouve parfois des angles inférieurs à **10°**.

* I : hauteur du triangle avant.

En principe rien ne s'y opposerait si tout le monde était conscient de l'accroissement des efforts qui en résultent, non seulement sur le mât et les haubans, mais aussi sur les cadènes et la structure de la coque, transversale et longitudinale, à hauteur du mât. Il peut être bon de rappeler que, partant d'un angle de **15°**, les efforts seront accrus d'environ **25%** pour **12°**, **50%** pour **10°** et **90%** pour **8°** !

Il ne faut pas oublier non plus que, pour un même allongement du hauban, plus l'angle est réduit, plus le déplacement du point d'attache est important ce qui entraîne à son tour une nouvelle réduction de l'angle. Le réglage est donc plus difficile et il serait logique, dans ces conditions, d'augmenter les coefficients de sécurité. C'est aussi la raison pour laquelle, avec des gréements de ce type, on utilise souvent, pour le galhauban de tête, de la barre dont l'allongement est plus faible et plus linéaire que le câble.

Personnellement, j'estime qu'on ne devrait jamais descendre au-dessous de **14°** pour un voilier de croisière * et de **10°** pour un voilier de compétition participant à des courses pouvant bénéficier d'une assistance rapprochée.

Les deux choix préalables étant effectués, on s'apercevra que le nombre d'étages de barres de flèche est lié au rapport **I/e**, qui devra rester inférieur aux valeurs ci-dessous.

	1 étage	2 étage	3 étages
Croisière	7,5	10	15
Course	10	13	20

Le nombre d'étages étant défini, leur position déterminera la longueur des panneaux de mât.

En fait, la position des points d'attache devrait être telle que les angles de la tangente à l'axe déformé du mât y soient nuls, pour qu'il ne se produise pas de déséquilibre entre les panneaux et donc de déformation indésirable du mât. Un de ces points est particulièrement important : l'attache du galhauban de tête. Il doit en effet, se situer en dessous du point d'attache de l'étai de façon à obtenir un équilibre entre le moment exercé au-dessus par le génois et le moment exercé en dessous par la grand-voile. On voit là l'impossibilité d'aboutir à une solution parfaite, puisque ces deux moments vont varier selon la surface des focs et la réduction de la grand-voile. Des calculs précis ne pourraient être effectués que dans un ensemble entièrement hyperstatique (mât et haubans) et pour tous les cas de figures possibles.

Ce problème ne peut être résolu élégamment que par la méthode des éléments finis.

* Avec cependant une certaine tolérance pour le galhauban de tête, car ces mâts n'étant pratiquement jamais rétreints, le panneau supérieur se trouve moins sollicité qu'il pourrait l'être, ce qui correspond à un facteur de sécurité supérieur.

Le tableau ci-dessous donne une première approximation des bases que l'on peut adopter pour chaque panneau à partir du bas en pourcentage de **I** pour des angles de haubans de 14° et 10°, pour un mât posé sur le pont.

	1 étage		2 étages			3 étages			
14°	52	48	40	35	25	28	29	25	18
10°	55	45	42	33	25	30	30	25	15

Ceci permet une réduction progressive de la longueur des barres de flèche. Pour un mât emplanté sur la quille, on augmentera le pourcentage du panneau intérieur de deux points.

Ces hauteurs sont prises depuis le niveau des cadènes. Si le pied de mât ou l'étambrai se trouvent au sommet d'un rouf, la hauteur de celui-ci sera déduite du panneau inférieur.

La distance entre les attaches de l'étai et du galhauban de tête sera égale à environ **6** x $\mathbf{S_f/S_{g\text{-}v}}$ pour mille du panneau de mât supérieur.

Dans notre exemple, nous avions **6** x **42/20** ‰ de **415** cm soit **5,2** cm arrondi à **5** cm.

Le raccourcissement progressif des barres de flèche est destiné à faciliter le passage de la chute du génois. Il ne faut pas oublier cependant qu'il conduit à une réduction de l'effort sur les haubans inférieurs et, par conséquent, à une augmentation de la charge sur le hauban supérieur et que les variations vont très vite.

Pour des voiliers de croisière dont la bordure des focs ne descend pas au ras du pont, on peut gagner en écartant les bas-haubans plus que les galhaubans, le croisement correspondant à la hauteur de la bordure la plus basse.

Les voiliers modernes étant de plus en plus larges, il est possible d'adopter une disposition du haubanage latéral qui permet à la fois d'obtenir un angle d'ouverture des génois aussi réduit qu'on le veut, tout en maintenant une bonne longueur pour la barre de flèche du galhauban de tête de mât. Cette solution consiste à placer la cadène de celui-ci le plus en abord possible, tout en maintenant des cadènes rentrées pour les galhaubans et bas-haubans inférieurs (FIGURE **6-33**).

La voile passe alors entre les deux haubans. Il faut veiller cependant à ce qu'il n'y ait pas conflit entre la chute et la barre de flèche supérieure, qui pour cela pourra être angulée vers l'arrière.

2 GRÉEMENT LONGITUDINAL

L'angle des étais se situe généralement aux environs de **20°** avec des écarts très faibles, rarement supérieurs à ± **1°**. Ceci s'explique pour deux raisons. La première, aérodynamique, car cet angle correspond à un axe du génois sensiblement vertical. La seconde mécanique car, comme nous l'avons vu, il peut se réduire de moitié — et encore moins avec un plan de voilure **3/4** et un mât souple — dans la partie supérieure, entre le point de drisse du génois et l'attache sur la tête de mât. On considérera avec la plus grande circonspection tout plan de voilure ou de gréement dont l'angle de l'étai serait inférieur à **18°**.

L'équilibre de la traction de l'étai est assuré en majorité par le pataras. L'allongement de l'étai sous la traction qui lui est appliquée étant responsable de l'importance de la flèche qu'il prend sous la charge, il est indispensable de pouvoir rattraper cet allongement par un raccourcissement du pataras. Il est donc nécessaire, même sur les voiliers de croisière, que celui-ci dispose d'un moyen de réglage puissant et précis, si l'on veut conserver un bon équilibre de la barre. Si, sur les voiliers de course, on a adopté presque partout le vérin hydraulique, sur un voilier de croisière toutes sortes de systèmes de palans et de ridoirs à volant ou manivelle sont disponibles.

On ne trouve pratiquement plus aujourd'hui de pataras double. Ceci ne faisait qu'augmenter le poids et le fardage. Le seul avantage pouvait être d'équilibrer un peu la torsion provoquée par le décalage, sur l'avant du profil, de l'attache de l'étai. Encore fallait-il pour cela que ce soit le pataras sous le vent qui soit sollicité. Lorsque, sur un voilier de croisière, on souhaite dégager le tableau arrière de la présence du pataras, on installera une patte d'oie assez haute pour laisser le passage d'un adulte.

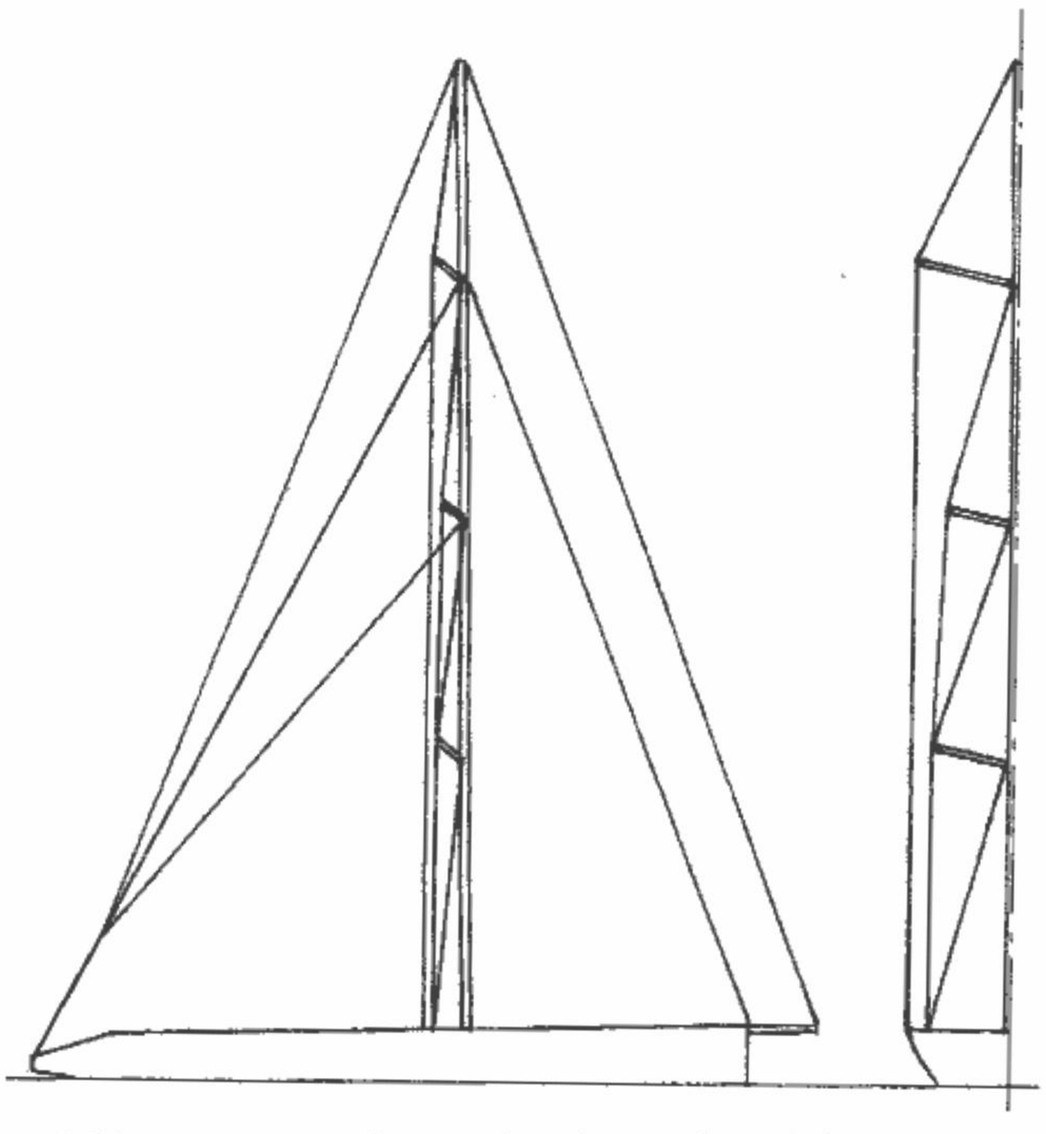


Fig. 6-33 • Gréement d'un voilier du Vendée Globe.

Le système de tension sera monté sur la patte d'oie mais, s'il n'est pas symétrique, le pataras devra y être lié par une poulie à câble de même résistance ou un palonnier, afin de ne pas provoquer de déséquilibre dans la tension des deux brins de la patte d'oie.

La tenue intermédiaire du mât est toujours un problème délicat, le seul moyen réellement efficace étant fourni par un ou deux étais intermédiaires, ou bas-étais, équilibrés par autant de bastaques et de bas-haubans avec du pied sur l'arrière. Mais cette disposition présente de nombreux inconvénients d'ordre pratique. Les étais intermédiaires gênent le passage des écoutes aux virements de bord. La manœuvre des bastaques est aléatoire avec un équipage réduit. De plus, elles ajoutent du poids, du fardage et de la complexité dans l'accastillage.

Quant aux bas-haubans décalés, ils empêchent de border la bôme convenablement au vent arrière, ce qui peut être dangereux en provoquant des empannages involontaires.

Nous allons voir qu'en fait, le plan de gréement variera selon la taille du voilier et le type de plan de voilure.

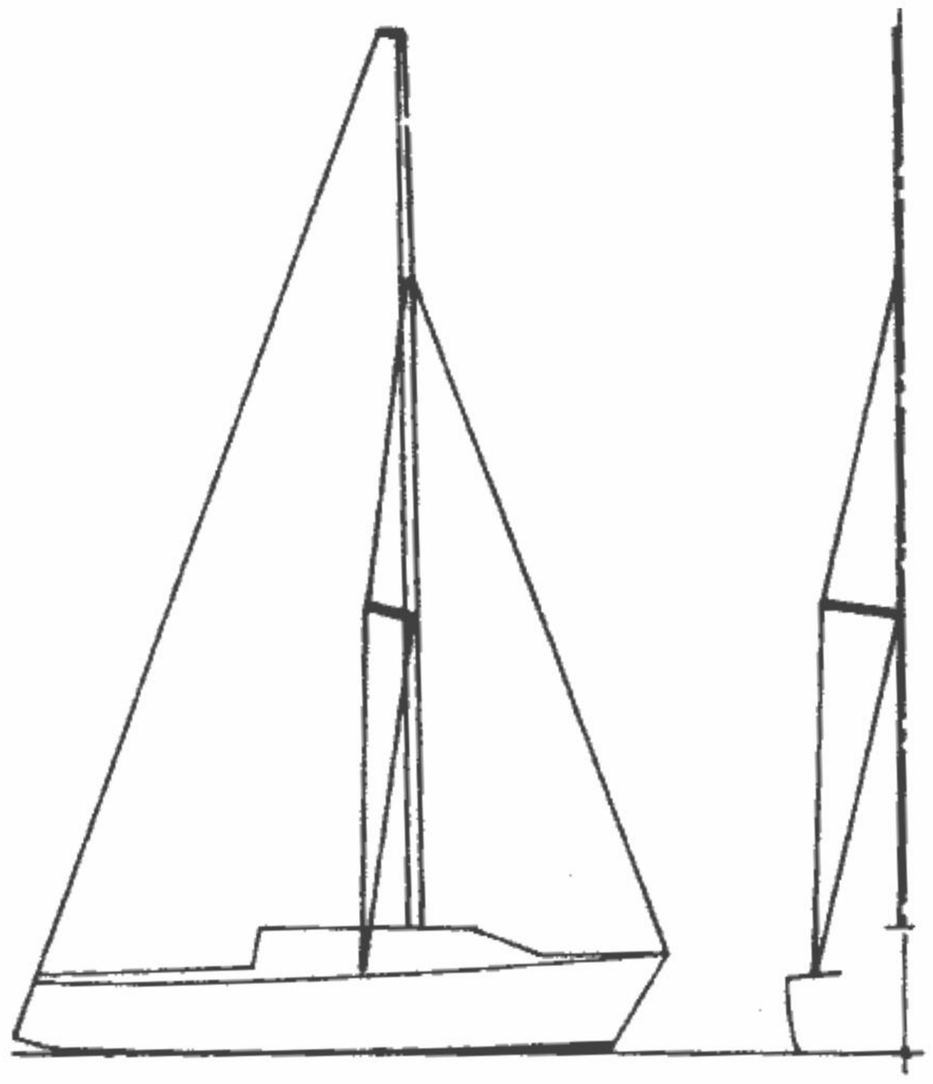


Fig. 6-34 • Gréement 3/4 d'un voilier de moins de 7 m.

▪ *Voilier de moins de 7 m à gréement 7/8 ou 3/4* (FIGURE **6-34**)

Les gréements en tête sont pratiquement inconnus dans cette taille. Le gréement consistera donc en un galhauban et un bas-hauban de chaque bord, tous deux décalés vers l'arrière, ainsi que les barres de flèche. La tenue du mât vers l'arrière est alors fournie par la poussée des barres de flèche. Il est bien entendu que celle-ci ne pourra être assurée que si les deux galhaubans restent tendus. En effet, si le bas-hauban sous le vent se détend, la résultante des poussées sur les barres de flèche tombe rapidement en arrière de la perpendiculaire à la traction de la grand-voile et le mât n'est plus tenu que par l'équilibre des moments exercés par la grand-voile, au-dessus et en dessous du capelage de l'étai.

Les bas-haubans ont essentiellement pour rôle de limiter l'action de la poussée des barres de flèche. Ils doivent donc être moins tendus que les galhaubans.

Attention avec ce type de gréement à la position de la sortie de la drisse de spinnaker. Trop au-dessus de l'attache des bas-haubans, elle peut faire cintrer le mât à l'envers, son effet s'ajoutant à celui du haut de la grand-voile.

La tension de l'étai est assurée par les galhaubans, mais aussi par la traction de la grand-voile.

Dans les plus grandes tailles, il peut devenir nécessaire, surtout sur les gréements **7/8**, de prévoir un pataras. Au près, il peut aider à cintrer le mât vers l'avant, la surface de grand-voile au-dessus du capelage étant trop faible. Au vent arrière, il est indispensable pour équilibrer la traction du spinnaker. L'angle du gréement transversal vers l'arrière qui, normalement, atteint une trentaine de degrés peut être réduit avec un pataras.

▪ *Voiliers de croisière à gréement en tête avec un seul étage de barres de flèche* (FIGURE **6-35**)

C'est sans doute le cas le plus simple. La tenue longitudinale du mât est assurée à mi-hauteur soit par une paire de bas-haubans de chaque bord, soit par un bas-étai et un bas-hauban décalé vers l'arrière.

L'angle des bas-haubans sera d'environ **6°** de part et d'autre de la verticale, celui du bas-étai d'au moins **10°**. Attention, les à-coups sur le bas-étai peuvent être très forts et sa cadène devra être reliée à une structure solide de la coque.

Sur des voiliers qui ne sont pas destinés à la croisière hauturière, le bas-hauban peut être dans le même plan que le galhauban, et le bas-étai, qui reste indispensable, peut être largable dans des conditions de mer non fatigantes pour le gréement.

▪ *Voiliers de croisière à gréement en tête avec deux étages de barres de flèche ou plus* (FIGURE **6-36**)

C'est avec ces gréements à plusieurs étages que la tenue longitudinale présente le plus de difficultés.

Si la voilure est celle de cotre, on aura un étai intermédiaire au niveau des barres de flèche supérieures. Celui-ci peut être suffisant pour assurer la tenue vers l'arrière, mais il a besoin d'être équilibré par une bastaque.

Si la longueur dépasse une dizaine de mètres, on pourra placer une paire de bas-haubans de chaque bord ou un bas-étai et un bas-hauban arrière. Mais aujourd'hui le gréement de cotre est souvent mixte, c'est-à-dire que, par vent modéré, on ne grée qu'un génois de sloop.

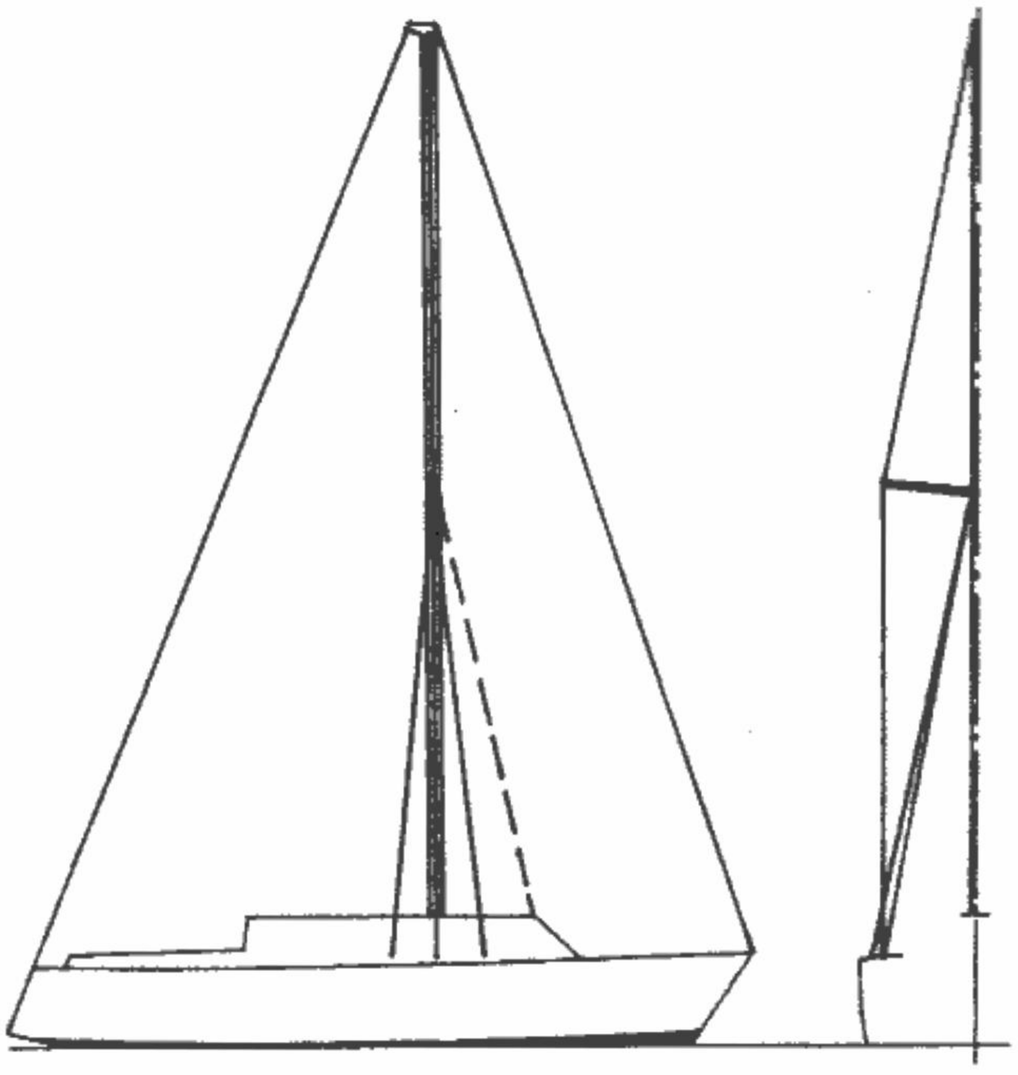


Fig. 6-35 • Gréement en tête d'un voilier de 8,50 m avec un étage de barres de flèche. La paire de bas-haubans avant peut être remplacée par un bas-étai.

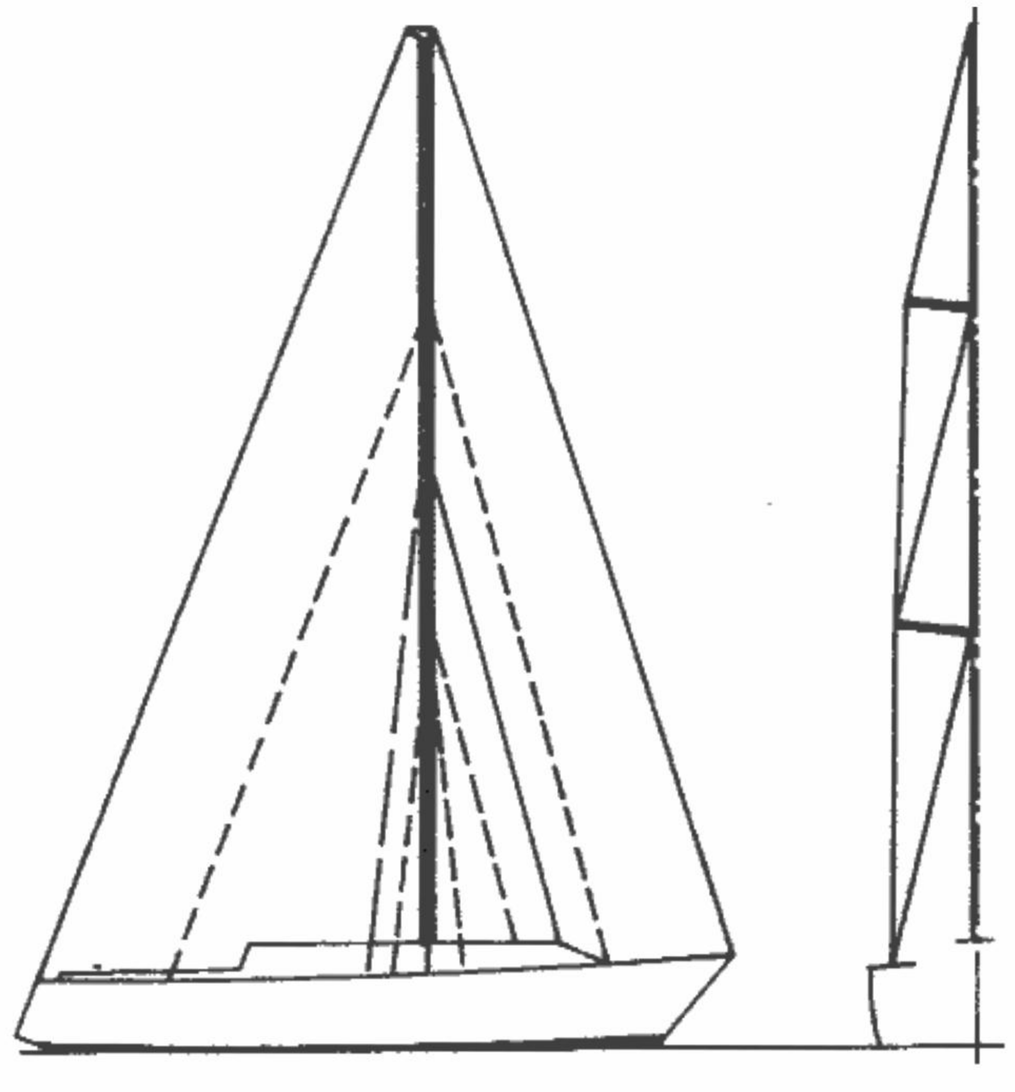


Fig. 6-36 • Gréement en tête d'un voilier de 10,50 m avec deux étages de barres de flèche. Pour un voilier plus grand ou un cotre, le bas-étai sera remplacé par un étai intermédiaire (qui peut être largable), équilibré par des bastaques, et deux paires de bas-haubans ou une paire arrière et un bas-étai.

L'étai intermédiaire et les bastaques peuvent alors être largués si l'état de la mer le permet, mais la tenue au niveau du premier étage doit être conservée.

Lorsque le plan de voilure est uniquement en sloop, on utilisera un bas-étai intermédiaire venant tenir le mât entre deux étages. La tenue vers l'avant est fournie normalement par la grand-voile, mais on pourra la compléter par un hauban volant lorsque les conditions de mer nécessiteront d'assurer une meilleure tenue.

▪ *Gréement fractionné* (FIGURE **6-37**)

Deux impératifs d'équilibre sont essentiels dans ce type de gréement : celui de la traction de l'étai et celui du cintrage du mât. Que le gréement transversal comporte un ou deux étages de barres de flèche, on aura toujours une bastaque à hauteur du capelage de l'étai et, éventuellement, une seconde à mi-hauteur du triangle avant. Sauf sur les voiliers de grande taille où la tenue vers l'arrière devra être assurée au moins par un étai intermédiaire largable, l'ensemble du gréement transversal est placé dans le plan du mât afin d'en permettre le cintrage.

L'équilibrage de ce cintrage est contrôlé par trois éléments, le pataras, la basse bastaque et, éventuellement, un guignol. L'action réciproque de la voile et du mât peut ainsi être réglée à la demande. Le guignol est un losange disposé

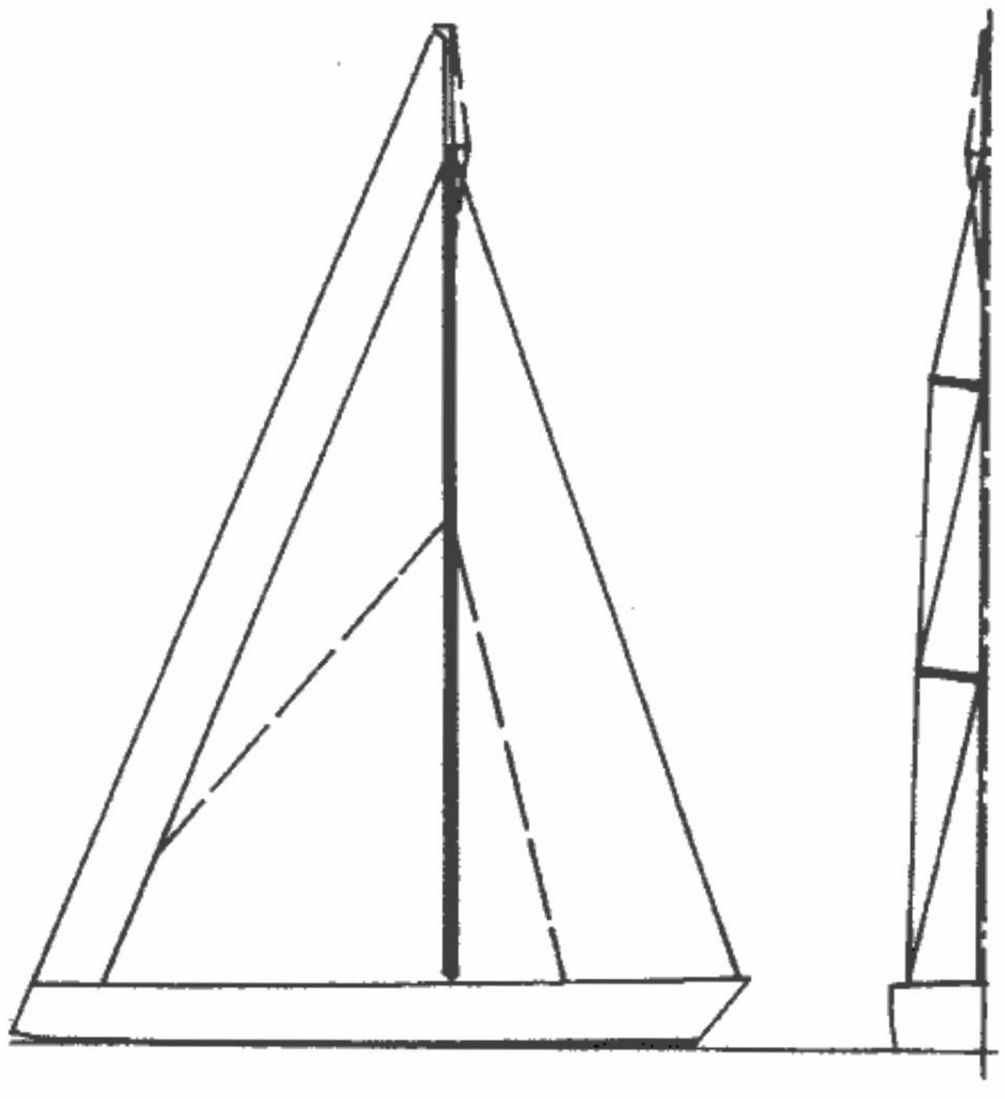


Fig. 6-37 • Pour un gréement 7/8 de voilier de 10-15 m, les bastaques sont indispensables. La tenue longitudinale est assurée par un bas-étai et des basses bastaques.

entre la tête de mât et l'étage supérieur et dont les barres de flèche sont ramenées vers l'avant pour qu'il agisse sur le panneau supérieur du mât dans les deux directions longitudinale et transversale.

Pour pouvoir répartir correctement l'action entre ces deux directions, il faut que l'angle des barres de flèche soit réglable. Mais la présence du guignol gêne le passage de la chute des génois.

Lorsque, comme dans le cas précédent, aucun haubanage antérieur n'est prévu, il faut faire très attention à la tenue du panneau inférieur du mât lorsque l'on est au largue sous spinnaker. À ce moment en effet, la poussée exercée par le tangon devient très élevée, et cela alors même qu'il n'y a plus de cintrage du mât. Sur des unités d'une certaine importance, il devient nécessaire de prévoir un bas-étai largable.

3 LES ARTIMONS (FIGURE 6-38)

Sauf aux allures portantes où ils peuvent soutenir une voile d'étai, ces mâts ne sont soumis qu'à des efforts latéraux et antéro-postérieurs.

Leur tenue latérale est donc assurée par un gréement classique avec galhaubans, un ou deux étages de barres de flèche, et un bas-hauban. Le gréement transversal peut être décalé vers l'arrière pour compenser le cintrage du mât.

La tenue longitudinale est assurée, en général, par un hauban intermédiaire prenant aux deux tiers de la hauteur de la voile et ayant un angle de tire vers l'avant d'une dizaine de degrés. Il faut veiller à ce que celui-ci ne vienne pas gêner le débattement de la bôme de grand-voile.

La drisse de la voile d'étai est munie d'une butée en tête de mât et revient, aussi en arrière que possible, pour servir de bastaque.

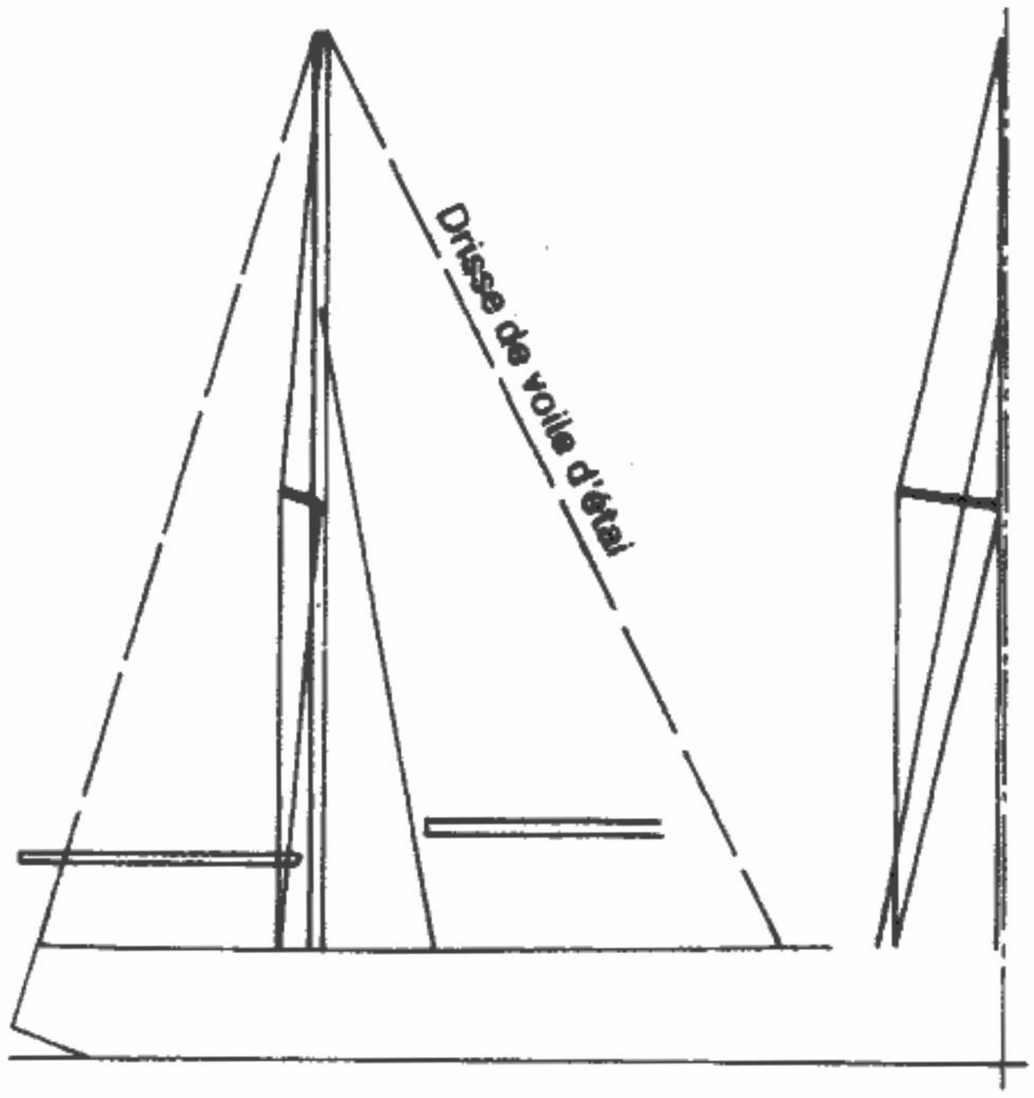


Fig. 6-38 • Gréement d'artimon.

4 LE PLAN DE VOILURE

Je ne m'étendrai pas ici sur le choix du type de gréement qui est traité dans le premier tome et dans *Voiles et Gréements*. Il reste cependant à voir quelques problèmes pratiques d'adaptation ou d'interférence avec la coque et le gréement.

La surface de voilure ayant été arrêtée en fonction du déplacement et du programme du voilier, la répartition entre le triangle avant et la grand-voile déterminera la position du mât.

Et c'est là que surgit la première difficulté. Que le mât soit posé sur le pont et soutenu par une épontille ou qu'il descende sur la quille, son emplacement et la structure qui est associée doivent s'intégrer dans les emménagements sans se nuire.

Il sera alors souvent nécessaire de déplacer l'un ou l'autre pour aboutir à un compromis acceptable, ce qui est loin d'être toujours facile.

On procédera alors à un premier contrôle de la position relative des centres de voilure et de dérive, déterminés selon les méthodes exposées au CHAPITRE 3 - TOME 2. Reste alors à mesurer la distance horizontale entre les centres de voilure et de dérive et à vérifier si cet écart correspond aux valeurs données dans le TOME 1 (CHAPITRE 7- § B - 1 - c - PAGE 189).

Il sera vraisemblablement nécessaire de procéder à un aménagement du plan de dérive, sans pour autant nuire à la répartition des poids.

L'architecte sera donc amené à faire une démarche circulaire passant en revue successivement : plan de voilure, position du mât, emménagements, écart des centres de voilure et de dérive, plan de dérive, lest, plan de voilure, etc., autant de fois qu'il sera nécessaire pour arriver à un résultat satisfaisant.

Restent quelques points à vérifier. Par exemple, il est toujours préférable que l'extrémité de la bôme ne puisse se prendre dans le pataras lors d'un empannage imprévu. Pour cela un arc de cercle ayant pour centre le vit de mulet et pour rayon la longueur hors tout de la bôme ne doit pas couper le pataras.

Au vent arrière, on évitera que la latte supérieure vienne en conflit avec le galhauban.

Le plan de voilure devra comporter toutes les indications nécessaires au voilier et les spécifications particulières telles que bandes de ris, coulisseaux de mât et de bôme, mousquetons de foc.

Il devra être précisé si les dimensions correspondent à la voile détendue ou normalement étarquée, ce qui est généralement le cas, en particulier pour les voiliers jaugés pour la course. Faute de cette précision, on risque de se trouver avec une voile trop grande que l'on ne peut étarquer normalement et une bôme qui pend lamentablement.

Toutes les mesures de jauge concernant la voilure et le mât doivent être données.

Lorsque la drisse de foc est métallique, sa position étarquée doit être constante quelle que soit la longueur du guindant du foc en place. Il faut donc munir chacune des voiles d'une itague de point de drisse et, éventuellement, de point d'amure, de façon à garder une longueur totale constante.

L'architecte devrait également déterminer les poids de tissus des différentes voiles. Malheureusement, il se repose souvent pour cela sur le voilier.

Il est certain que celui-ci est parfaitement capable de le définir mais, lors de consultations auprès de plusieurs voiliers, il est indispensable de leur fournir des données communes si l'on veut que les propositions soient comparables.

Certains architectes étrangers, comme le cabinet SPARKMAN & STEPHENS fournissent à leurs clients un diagramme de réduction de voilure en fonction du vent réel. ⚓

BIBLIOGRAPHIE - CHAPITRE 6 •••

1 • C.A. MARCHAJ & J. TANNER :
Wind tunnel tests of a 1/4 scale Dragon rig.
Suyr n°14. University of Southampton.

2 • R. STEPHENS :
Sailboat rigging
12th AIAA Symposium Vol. 28. Sname 1982.

3 • M. WOLFER :
Mâts et gréements. Hors série n°26.
Loisirs Nautiques.

7

HABITABILITÉ

La vie à bord d'un voilier de croisière peut s'apparenter à celle que l'on connaît en villégiature, c'est-à-dire qu'elle se déroule à la fois à l'intérieur et à l'extérieur. Elle a également beaucoup de points communs avec celle que l'on peut connaître à bord d'une caravane, en raison de l'exiguïté du lieu et de la promiscuité qui en résulte, mais avec, en plus, les contraintes et sujétions liées aux mouvements et à un environnement facilement agressif.

Ce chapitre est surtout consacré à l'étude des différents modules constituant les emménagements du voilier de croisière et à leur aspect ergonomique, indispensable pour que la vie puisse s'y dérouler le moins mal possible, plutôt qu'à la disposition relative de ces éléments.

Celle-ci en effet découle bien souvent d'une mode (les cabines arrière actuelles en sont un exemple) et l'on trouvera facilement dans les revues nautiques françaises et étrangères des exemples de toutes les combinaisons possibles.

C'est pourquoi je n'ai pas intitulé ce chapitre emménagements, mais habitabilité *.

Avant d'établir un projet de disposition d'emménagements, il ne faut surtout pas oublier que, dans la majorité des cas, ceux-ci forment une part importante de la structure.

La position du mât et des cadènes, le varangage, constitueront donc des « passages obligatoires » dont dépendront l'emplacement des cloisons principales.

Sauf pour de petites unités de navigation côtière pour lesquelles ce problème peut être résolu autrement, il ne faut surtout pas, uniquement pour ménager les espaces d'habitation, aboutir à une construction déstructurée dans laquelle le mât n'est soutenu que par une épontille, les cadènes sont attachées sur le bordé, sans qu'aucun lien ne réunisse ces éléments entre eux et avec la quille. On peut être assuré qu'un tel voilier souffrira rapidement de déformations entraînant une dégradation de la structure et de la coque.

S'il faut tout faire pour améliorer l'habitabilité du voilier, cela ne doit en aucun cas être obtenu au détriment de l'intégrité de la structure. Il faut penser également à équilibrer latéralement les masses des différents modules, si l'on ne veut pas se retrouver avec un centre de gravité décentré. Une disposition avec coursive décalée et cuisine, carré et toilette du même bord, intéressante car ces trois modules sont sensiblement de même largeur, sera difficile à équilibrer.

D'autres éléments de décision du choix de la disposition des emménagements dépendent des programmes de navigation et des goûts ou du caractère du propriétaire. Il s'agira tout d'abord de définir la proportion de vie à l'extérieur et à l'intérieur. Elle dépendra de la répartition géographique des zones de navigation et de la proportion entre la durée de navigation et la durée d'escale.

* A ce propos, une querelle s'élève souvent entre le choix des termes emménagement et aménagement. Personnellement, je réserve le premier pour désigner la disposition des différents modules ou cellules constituant les « pièces » du bateau, et le second aux « meubles » qui les garnissent.

Ainsi celui qui naviguera beaucoup, et sous des climats peu cléments, préférera sans doute un cockpit relativement étroit et profond offrant une bonne sécurité et un intérieur clos dont les surfaces vitrées ne seront là que pour l'éclairage et dont le confinement procurera un sentiment de confort et de protection contre les éléments.

A l'opposé, un propriétaire plus extraverti souffrira de claustrophobie dans un tel voilier et, comme il préférera souvent le soleil et les longues escales, un vaste cockpit lui sera nécessaire et un carré surélevé permettant de jouir du paysage lorsqu'on doit se tenir à l'intérieur le satisfera beaucoup mieux. C'est pourquoi la variété des plans d'emménagements est si grande et qu'aucun ne peut constituer un modèle idéal et universel.

Cependant, ceux-ci se divisent toujours en un certain nombre de modules correspondant à des activités spécifiques et qui s'articulent à partir d'une zone de transit qui devrait constituer une sorte de sas entre les activités extérieures, soumises aux aléas des intempéries et de l'état de la mer, et les activités intérieures pour lesquelles on veut au contraire en être protégé. Principe difficile à concrétiser sur des petites unités et qui donne lieu à toutes les interprétations possibles.

Même s'il n'est pas toujours nécessaire qu'il entre dans les détails de la réalisation, l'architecte doit fournir un plan d'emménagements suffisamment détaillé pour être réalisé sans contestation possible par le chantier. Néanmoins, il doit connaître, et au besoin imposer, un certain nombre de détails qui ont trait à la sécurité, au confort ou à la commodité de la vie à bord qui feront qu'un voilier sera plus ou moins agréable à vivre et satisfera son propriétaire.

Par ailleurs, un certain nombre des points qui seront étudiés ci-après sont, lorsqu'ils ont un rapport avec la sécurité, soumis à la réglementation française et, depuis le 16 juin 1996 à la Directive européenne. Les normes sur lesquelles celle-ci s'appuie, qu'elles soient déjà publiées ou en cours d'élaboration, seront citées dans chacun des paragraphes afin que nul ne les ignore.*

Pour pouvoir vérifier plus facilement sur le plan la validité des dispositions que l'on adoptera, il sera bon de réaliser un petit bonhomme articulé dont la FIGURE 7-1 est le modèle. On se méfiera de ceux que l'on trouve dans le commerce qui ont une taille trop grande et les bras trop courts.

* Le texte de la Directive 94/25/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 juin 1994 a été publié au *Journal Officiel des communautés européennes* du 30 juin 1994.
Le Bureau de la Navigation de Plaisance du Ministère de l'équipement, 3, Place Fontenoy, 75700 Paris 075P a édité une note de présentation de cette directive.
On peut se procurer les normes ISO, CEN ou AFNOR, moyennant finance, à l'AFNOR, Tour Europe, 92049 Paris La Défense cedex.

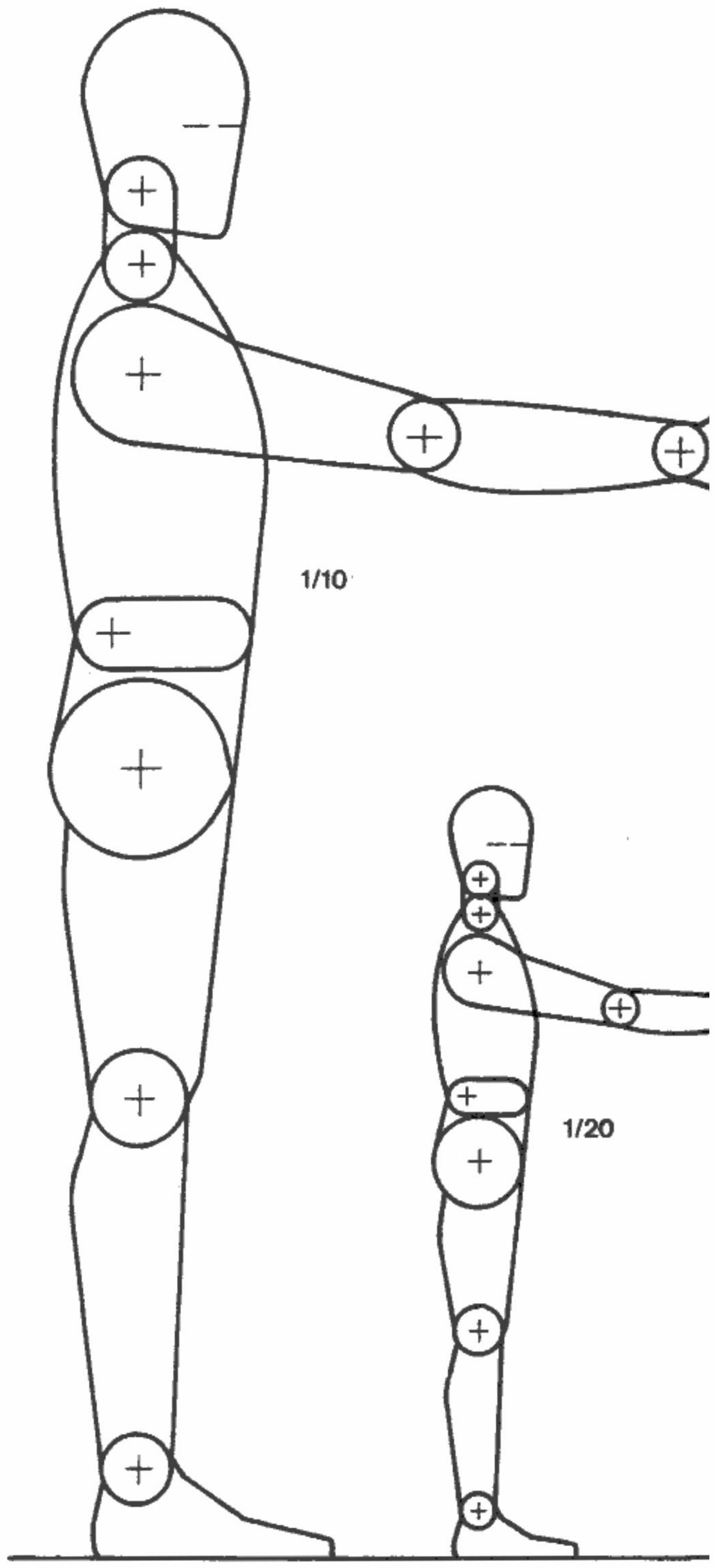


Fig. 7-1 • Personnage articulé à réaliser en rhodoïd. Les éléments sont assemblés par des rivets creux qui permettent l'articulation. (Échelles, 1/10 et 1/20).

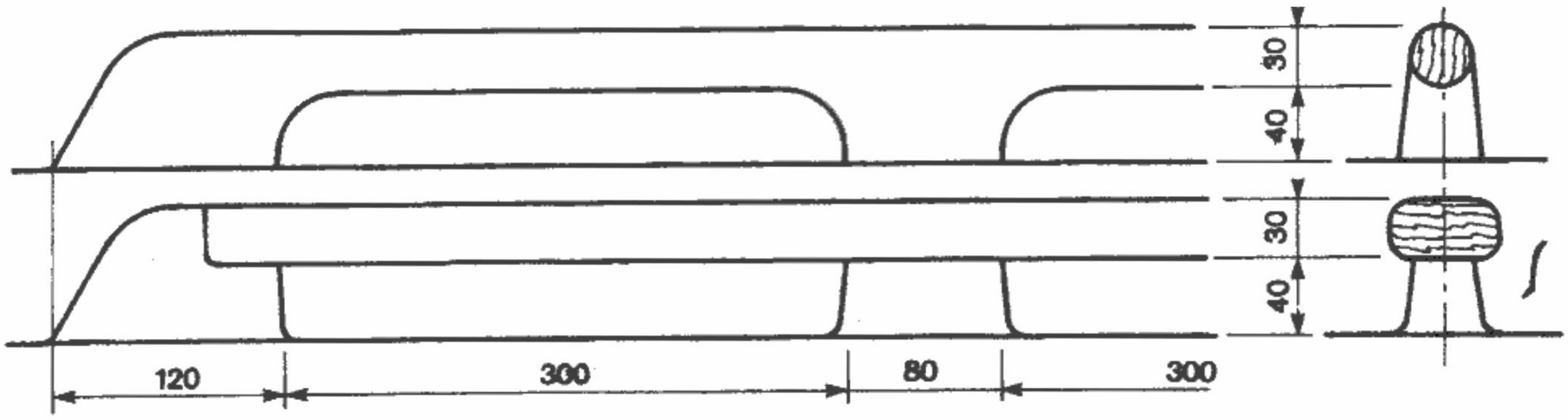


Fig. 7-2 • Dimensions minimums d'une main courante classique en bois (en haut) et sa transposition sur une coque en stratifié.

A ▪ COCKPIT ET PLAN DE PONT ❋❋

Les normes suivantes concernent ce paragraphe :
ISO 11812 : cockpits et évacuation de cockpit.
ISO 9093-1.2.3 : vannes et passe-coque.
ISO 12216 : fenêtres, hublots, panneaux, tapes et portes.
ISO 15085 : filières, ligne de vie et main courante.

Nous abordons ici le domaine de la vie extérieure qui leur impose d'assurer deux fonctions : la manœuvre du voilier et la vie aux escales.

La première doit répondre avant tout à deux impératifs : la sécurité et la commodité auxquelles contribuera un confort évitant les fatigues inutiles.

Au niveau du pont, la sécurité sera favorisée par l'absence de décrochements et de tout ce qui peut présenter une entrave à un déplacement rapide des équipiers ou un risque de chute, comme par exemple certains roufs aux hiloires et à l'avant trop (ou pas assez) inclinés et pourvus de larges surfaces vitrées glissantes.

Une mode venant de la course (une de plus !) a vu à une certaine époque la disparition des roufs au bénéfice du *flush deck*. Si cette solution se justifie en course (surtout sur des grands voiliers dont la stabilité de plate-forme offre un terrain plus sûr) où des équipiers entraînés doivent pouvoir se déplacer rapidement d'un bord à l'autre, même au prix d'une course d'obstacles, il n'en va pas de même pour un voilier de croisière ; équipage réduit, parfois plus très jeune, peu entraîné, temps de manœuvre sans contrainte s'accommoderont beaucoup mieux d'un rouf bien dessiné sur lequel seront ramenés tous les accastillages et équipements, libérant totalement le couloir offert par le passavant où, sans fausse honte, on pourra circuler à quatre pattes.

D'autres éléments interviendront dans la sécurité de circulation sur le pont. Côté rouf, ce seront d'abord des mains courantes correctement dimensionnées (FIGURE 7-2), une ligne de vie solide ou un rail longeant la base du rouf depuis les hiloires de cockpit.

En abord, la sécurité sera assurée par les filières réglementaires mais surtout par un pavois d'au moins une dizaine de centimètres. Celui-ci offre de multiples avantages. Plus efficace qu'un simple cale-pied, il réduit l'espace avec la filière intermédiaire et peut recevoir écubiers et taquets permettant un amarrage correct dans toutes les conditions, sandow de brélage des focs et tous autres équipements qui encombrent habituellement les passavants.

Sur un voilier assez grand (à partir d'une quinzaine de mètres), il sera possible d'améliorer le confort et la sécurité des équipiers travaillant au pied du mât en plaçant une rambarde de chaque côté de celui-ci. Sa hauteur sera de **0,80** m et elle sera écartée de **0,50** m de la pièce d'accastillage la plus proéminente. Sa solidité dans le sens transversal doit être très grande. C'est pourquoi on prévoira, en son milieu, un pied écarté vers l'extérieur (FIGURE 7-3).

La face arrière du rouf et la descente doivent également être étudiées pour la sécurité, car c'est à la sortie que les accidents peuvent arriver.

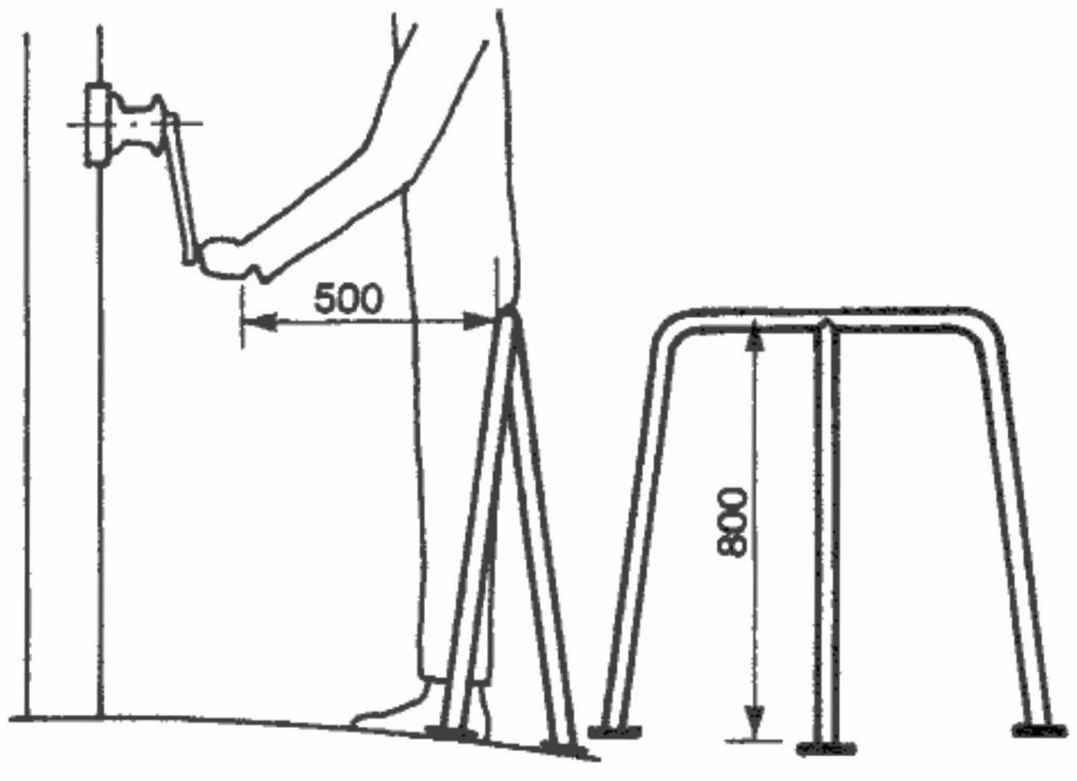


Fig. 7-3 • Rambarde de mât.

Si la descente est équipée de panneaux mobiles, ne pas oublier que ceux-ci doivent pouvoir être verrouillés de l'intérieur et de l'extérieur. C'est une des leçons tirée du Fastnet 79, et il est malheureux qu'aucun fabricant d'accastillage n'ait encore, 20 ans après, proposé un produit adapté. Le panneau supérieur sera bien sûr pourvu d'un large louvre pour l'aération. Des panneaux en acrylique peuvent être prévus pour les jours de pluie au mouillage. Ne pas oublier les restrictions concernant la hauteur du surbau de la descente, variable selon la catégorie de navigation. Des mains courantes seront fixées de chaque côté de l'ouverture et il serait très judicieux d'en placer également sur le bord arrière du toit, ce que l'on voit très rarement.

Les capots de descente soulèvent toujours un problème d'étanchéité, même lorsqu'ils sont pourvus d'une boîte dans laquelle ils s'escamotent. Les côtés de cette boîte doivent se prolonger jusqu'à l'arrière du rouf de façon à constituer une chicane qui débouchera sur l'arrière pour permettre un écoulement facile de l'eau. Le capot coulissera sur des rails métalliques. Si l'on donne une légère pente au-dessus du capot et de ses hiloires intérieures par rapport aux rails, il sera possible d'assurer, lors de la fermeture, un léger serrage sur un joint en tube creux de néoprène (à placer à l'intérieur du capot) qui améliorera beaucoup l'étanchéité.

La largeur du capot de descente sera comprise entre **500** et **600** mm et sa limite antérieure devra être au moins à **150** mm en avant de la première marche de la descente (FIGURE **7-4**).

La pente idéale d'une échelle de descente est de **60°**, mais on peut aller jusqu'à **70°**. L'espacement des marches sera de **250** mm et leur largeur minimum de **150** mm. La distance entre les montants ne sera pas inférieure à **350** mm. Si l'échelle peut être plus large on remontera les côtés des marches de **20°** environ en laissant au centre une partie horizontale de **300** mm. Le dessus des marches sera revêtu d'un antidérapant et les montants, ainsi que la face arrière intérieure du rouf, seront munis de mains courantes.

En croisière, une capote de descente procurera un confort appréciable, non seulement au mouillage où il sera possible de laisser la descente ouverte et à l'ombre (ou à l'abri de la pluie), mais aussi en mer, par mauvais temps, si elle est aussi large que le rouf.

A une époque, les hiloires de cockpit de certains plans de O. STEPHENS se prolongeaient sur le dessus du rouf, ceinturant l'avant de la descente selon une courbe continue. En dehors de la qualité esthétique d'un tel dessin, cette hiloire constituait un brise-lames assurant une bonne protection et son chant portait un rail dans lequel venait se glisser la ralingue de la capote rendue ainsi totalement étanche à son joint avec le rouf.

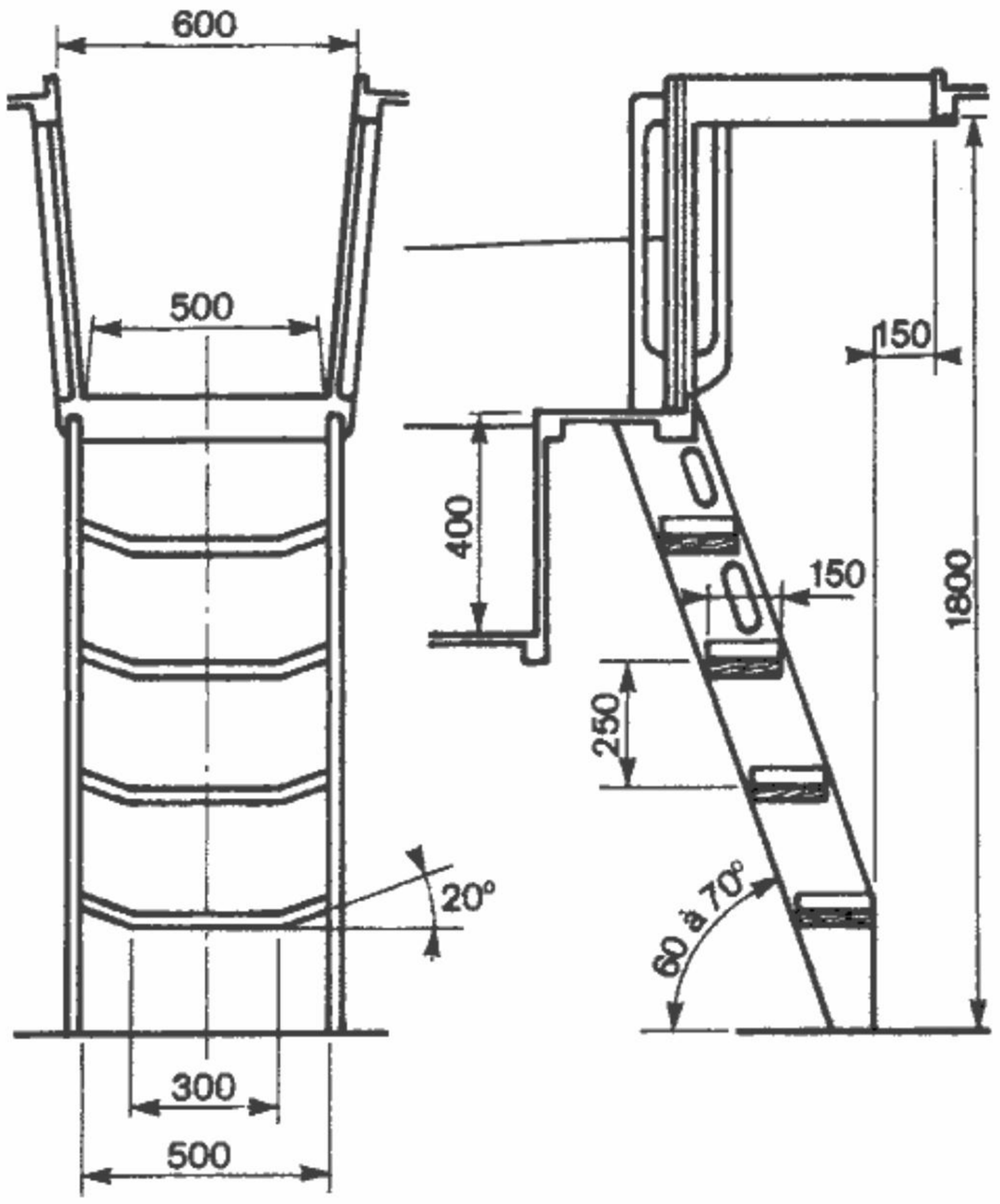


Fig. 7-4 • Descente, dimensions minimums (sauf hauteur des marches).

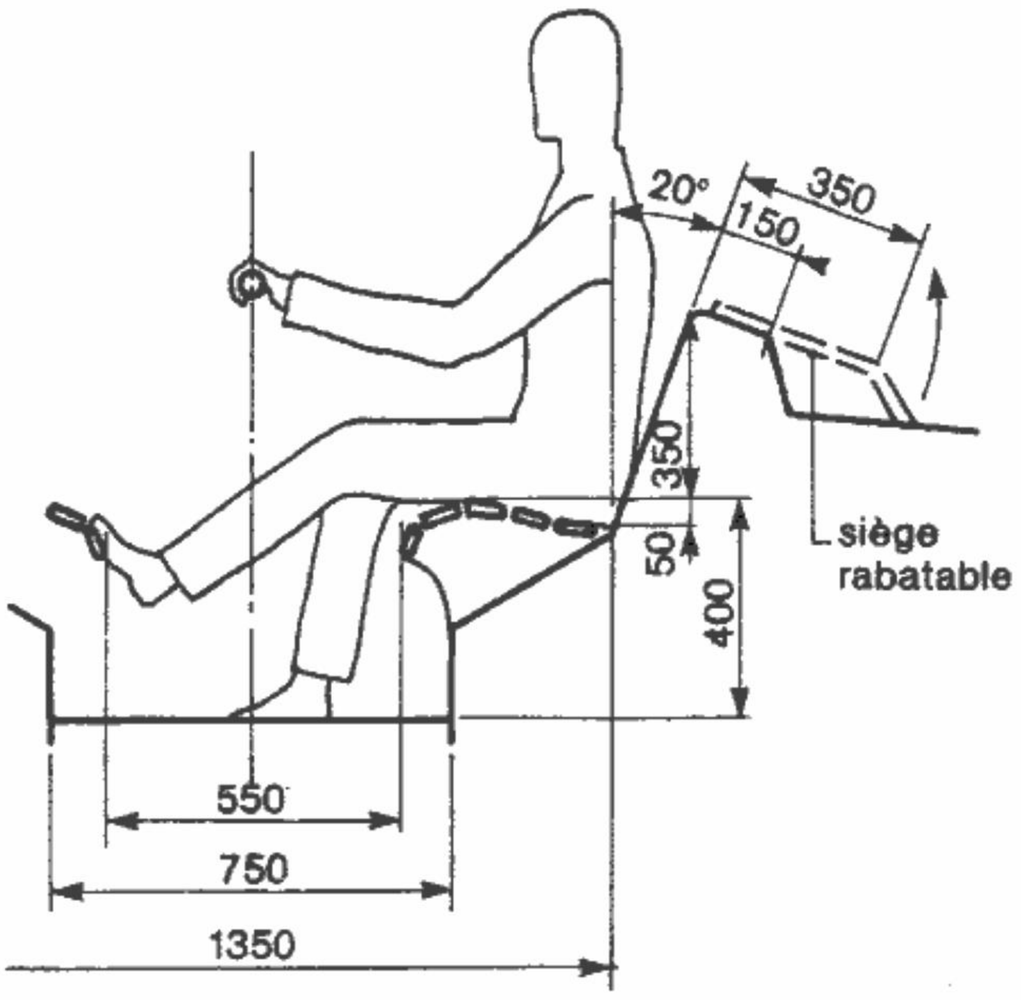


Fig. 7-5 • Cockpit « de mer ».

La capote sera bien sûr pourvue d'une fenêtre « panoramique » en plastique souple (le même qui est utilisé sur les voiles) pour ne pas trop réduire la visibilité du barreur.

Le cockpit est susceptible de traitements différents, selon la taille et le programme de navigation (FIGURE 7-5).

Le cockpit « de mer » sera relativement étroit et profond, afin que barreur et équipiers de quart puissent se caler facilement contre le banc en vis-à-vis. Ses hiloires et ses bancs seront largement inclinés vers l'extérieur pour présenter un profil confortable à la gîte.

Le dessus de l'hiloire devra, au moins à la place du barreur, présenter une largeur suffisante pour que celui-ci puisse s'y asseoir pas temps maniable, bénéficiant ainsi d'une vue plus dégagée.

Le siège peut être fourni par une petite plate-forme fixe ou amovible et — pourquoi pas— capitonnée. La longueur du cockpit sera d'au moins deux mètres afin de pouvoir s'y allonger par beau temps ou au mouillage.

Il peut être bon que l'écartement des hiloires à hauteur du cockpit soit plus grand que la largeur du rouf, surtout si celui-ci est haut par rapport aux bancs, afin de dégager une vue latérale.

Cette question du champ de vision du barreur est extrêmement importante et trop souvent négligée, quand ce n'est ignorée. Il est certain que beaucoup d'éléments contradictoires réduisent les solutions possibles, mais l'architecte doit y apporter le plus grand soin en pensant aux deux situations que représentent : la navigation en mer (visibilité sur tout l'horizon à partir d'une distance de **25** m environ, assis dans le cockpit), et les manœuvres de mouillage (visibilité vers l'avant à partir d'une distance réduite à **10** m environ, debout dans le cockpit).

Il sera toujours plus agréable de disposer de bancs en lattes de bois qui permettront, de plus, de rester au sec. Pour ne pas être douloureuses, ces lattes seront plates, assez larges avec des espaces réduits, et pas trop épaisses pour conserver une certaine souplesse. Le profil de la section de ces bancs doit assurer le confort et un bon appui aux pieds des équipiers.

Si l'on ne craint pas de perdre un peu de volume sous ces bancs il sera toujours préférable de donner au-dessus des coffres une forte pente vers l'intérieur, pour permettre une évacuation rapide de l'eau du côté sous le vent. Sinon, il faudra prévoir des gouttières ou des conduits assurant cette évacuation vers l'intérieur du cockpit.

En inclinant la face avant des caissons, il est possible de disposer d'une surface au sol plus grande que celle délimitée par les bancs.

Des pitons solides devront être prévus pour l'amarrage des harnais du barreur et des équipiers de quart.

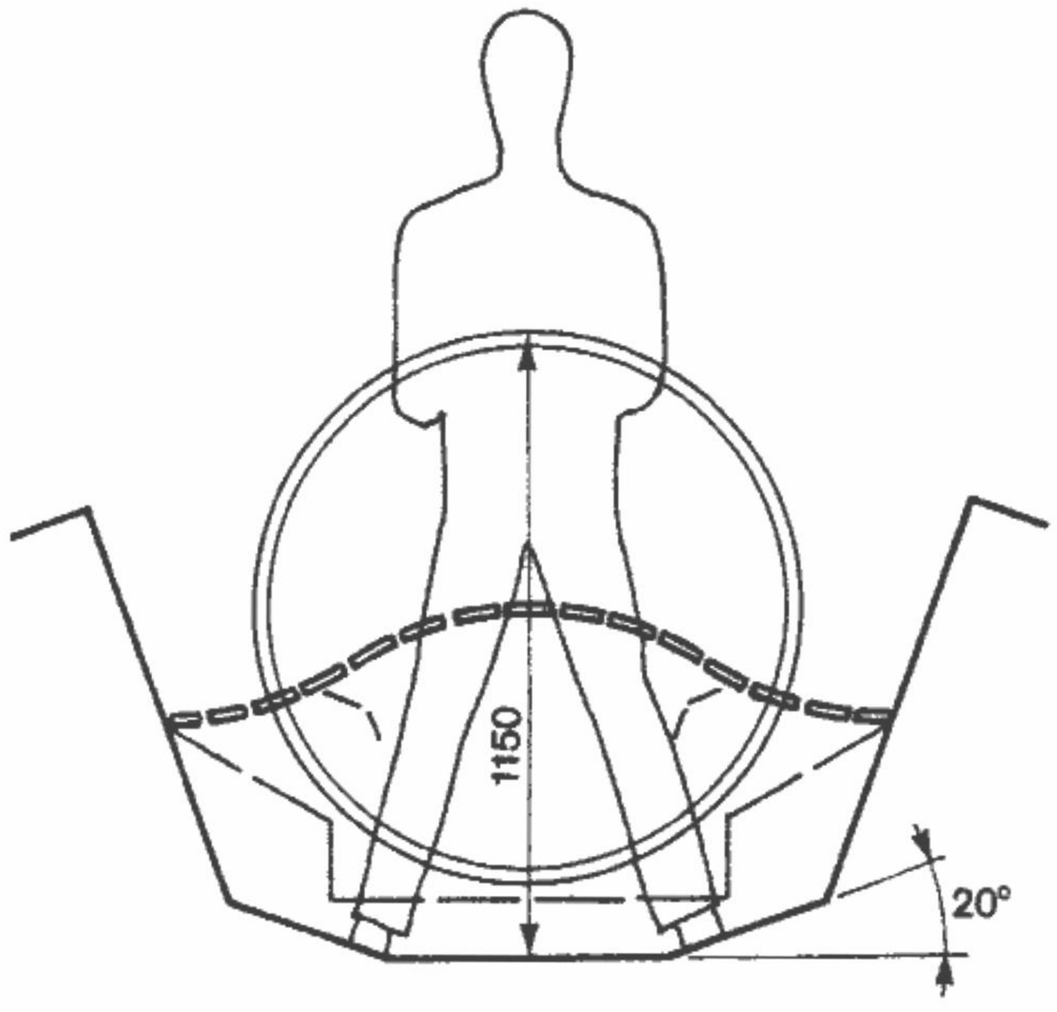


Fig. 7-6 • Cockpit et siège pour barre à roue, un marchepied rabattable sera installé pour le barreur assis.

Le plancher en arrière d'une barre à roue pourra être remonté de chaque côté selon un angle de 20° pour permettre au barreur debout de se caler à la gîte et, s'il est prévu qu'il puisse s'asseoir, on donnera au banc situé à l'arrière du cockpit une forme convexe, afin qu'il puisse se caler au vent à la gîte (FIGURE 7-6). Lorsque la barre à roue est de grand diamètre, les bancs latéraux seront interrompus pour permettre le passage.

Un caillebotis au fond du cockpit est toujours agréable, il sera muni d'un cale-pied dans son axe longitudinal.

Celui-ci, parfois dédoublé d'ailleurs, devient indispensable dans un cockpit « de mouillage » dont les dimensions plus vastes ne permettront pas au barreur de se caler sur le banc en vis-à-vis.

On préférera, en général, que le dessus de ceux-ci soit horizontal, mais il est tout à fait possible que la partie lattée soit, au moins partiellement au niveau du barreur, montée sur charnières de façon à pouvoir occuper une position inclinée en navigation.

Le dispositif de vidange du cockpit doit assurer celle-ci en 3 minutes jusqu'à une hauteur d'eau de **100** mm au-dessus du fond. Le débit des vidanges peut être connu en première approximation par la formule :

D l/mn = **0,037** $\sqrt{\mathbf{d^5 . H/L}}$ avec

d : diamètre du conduit en mm ;

H : hauteur du niveau supérieur de l'eau dans le cockpit en m ;

L : longueur du conduit en m.

Avec plusieurs évacuations, il faudra calculer le débit de chacune et les additionner. Lorsque plusieurs évacuations se raccordent sur un conduit unique, on considérera le diamètre le plus faible de chacune et la longueur totale, et on vérifiera que le débit au niveau du conduit commun n'est pas inférieur au total des débits unitaires.

Ayant calculé le volume total du cockpit pouvant être envahi, il sera facile de connaître le temps nécessaire à sa vidange.
Exemple : soit un cockpit dont le volume envahissable est de **1,73** m³ et dont le point le plus bas des hiloires se trouve à **1,20** m au-dessus de la flottaison. Les deux conduits d'évacuation de **38** mm (1 pouce 1/2) se raccordant sur une vanne de **51** mm (**2** pouces), la longueur totale d'un circuit (y compris la partie commune) est de **0,75** m.
On aura :
débit des conduits unitaires :
$\mathbf{D = 0{,}037\ \sqrt{38^5 \times 1{,}2/0{,}75} = 416{,}6}$ l/mn
soit au total : **416,6 x 2 = 833,2** l/mn.
Le temps nécessaire à la vidange sera :
1 730/833 = 2,08 minutes.
Au niveau de la vanne, le débit sera :
$\mathbf{D = 0{,}037\ \sqrt{51^5 \times 1{,}2/0{,}75} = 869{,}3}$ l/mn, c'est-à-dire un peu supérieur à la somme de ceux des conduits unitaires.

La norme ISO 11812 définit un mode de calcul plus précis.

Les embouchures des évacuations devront se trouver toujours légèrement en dessous du fond du cockpit, au besoin dans une petite souille, ou à l'extrémité d'une rigole en pente. Elles seront situées sur l'arrière du cockpit car, en cas d'envahissement, le voilier s'enfoncera de l'arrière et le fond de cockpit s'inclinera. En revanche lorsqu'il est lège, l'arrière se lèvera, la pente du fond (ou celle des rigoles) devra donc être déterminée pour ce cas, afin que, lorsque le voilier est laissé au mouillage, la pluie puisse s'évacuer facilement.

La grille de protection doit se restreindre à un simple croisillon pour limiter le moins possible le débit. Par contre, il sera bon de prévoir des bouchons lorsque l'on devra bricoler dans le cockpit.

Les conduits d'évacuation pourront être rigides lorsqu'ils font partie intégrante de la structure. C'est le cas en particulier des constructions métalliques ou en stratifié lorsqu'un tube, en PVC rigide par exemple, peut être entièrement stratifié du cockpit à la coque. Le cas peut se rencontrer également sur des constructions en bois, lorsqu'une partie au moins du conduit est constituée par une cloison de structure.

Si la structure avoisinant les conduits est insuffisante et que des contraintes élevées sur ceux-ci sont à craindre, on pourra néanmoins utiliser des conduits rigides à condition de les sectionner au-dessus de la flottaison en reliant les deux éléments par une manchette souple, fixée par deux colliers à chaque extrémité.

Dans les cas de conduits rigides, une vanne de sortie n'est pas obligatoire. Dans tous les autres cas, les conduits seront réalisés en tuyau armé et une vanne sera prévue à la sortie sur la coque. L'accès à cette vanne devra pouvoir être instantané, sinon il faudra la munir d'une commande à distance. On choisira un chemin aussi direct que possible et on évitera toute restriction de diamètre.

Il est toujours agréable de disposer, dans le cockpit, de coffres de rangement. Si le point le plus bas n'est pas à moins de **40** cm du fond du cockpit, il n'est pas obligatoire que leur fermeture soit rigoureusement étanche, néanmoins, j'estime que cela reste une bonne précaution sur un bateau de grande croisière. La fermeture s'effectuera par un moyen positif assurant le serrage d'un joint. Dans tous les cas, le coffre lui-même devra être étanche par rapport aux autres emménagements.

Nous verrons au CHAPITRE 10 comment doivent être placés les winches pour que l'effort des équipiers bénéficie du maximum de rendement.

Les taquets seront fixés sur ou à l'extérieur des hiloires mais pas à l'intérieur où, même s'ils sont encastrés dans un décrochement, ils rendraient l'appui du dos inconfortable, voire dangereux.

Une barre franche devra se situer au moins à **0,35** m au-dessus du banc du barreur et pas à plus de **0,85** m du plancher pour pouvoir barrer avec les fesses. Le sommet d'une barre à roue manœuvrée debout ne sera pas situé à plus de **1,25** m du plancher de cockpit pour que les avant-bras ne fatiguent pas trop, mais **1,15** m serait préférable pour maintenir une bonne circulation du sang.

B ▪ CARRÉ

En dehors de sa fonction de passage vers les autres parties des emménagements, le carré est généralement utilisé pour deux « activités » bien distinctes qui, à terre, seraient dévolues à la salle de séjour et à la chambre à coucher, la vie de jour et le sommeil.

La fonction de passage est importante dans la mesure où, un voilier monocoque naviguant une bonne partie du temps gîté, l'équilibre y est instable. Il est donc indispensable que le carré, plaque tournante des emménagements, offre, d'une part, des prises suffisamment nombreuses et rapprochées aux équipiers devant y circuler et, d'autre part, qu'il présente le moins possible d'obstacles et que ceux-ci ne soient pas contondants.

Les prises seront fournies par les épontilles et par des mains courantes placées à la base des hiloires de rouf et au plafond.

On évitera les risques de contusion sur les éléments d'aménagement en faisant la chasse à tous les angles vifs, coins ou arêtes, ceci étant d'ailleurs valable pour l'ensemble des emménagements.

L'activité de jour s'organisera essentiellement autour de la table du carré dont l'importance et la disposition dépendront de la taille du voilier. Néanmoins, quelle que soit cette disposition, il est indispensable de respecter un certain nombre de dimensions pour obtenir un confort raisonnable. Celles-ci sont représentées sur la FIGURE 7-7.

La table du carré sera aménagée en fonction de l'espace environnant (nécessité d'un abattant pour laisser le passage par exemple) et de ses dimensions (bloc central permettant le rangement de bouteilles et de verres, si elle est assez large). Ses coins seront bien sûr arrondis et son pourtour muni de violons, de préférence amovibles pour les séjours en escale. La table inclinable au roulis est de peu d'intérêt car les hauteurs par rapport aux banquettes ne sont plus respectées, ce qui devient vite inconfortable.

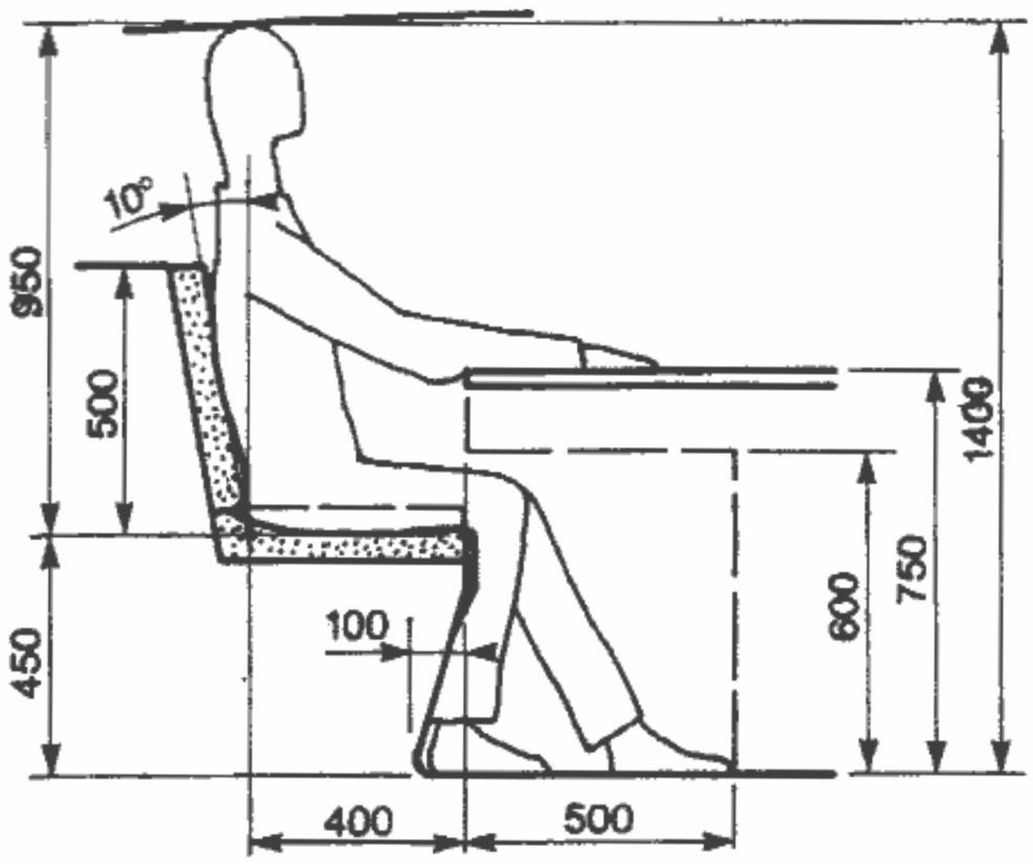


Fig. 7-7 • Banquette et table de carré.

Pour la nuit, on distingue plusieurs types de couchettes. Toutes ont cependant un impératif commun, la longueur, qui pourra n'être que de **1,70** m pour des enfants mais devra normalement atteindre **1,90** m pour recevoir la majorité des adultes.

La largeur dépend des goûts de chacun et du type de couchette. Des couchettes fixes, utilisées au mouillage, pourront atteindre **0,65** à **0,70** m, il sera possible de s'y tenir en « chien de fusil ». Mais des couchettes de mer ou des cadres en toile seront plus étroits d'une dizaine de centimètres afin de pouvoir s'y caler et, alors que les premières seront planes et horizontales, les secondes seront creuses (FIGURE 7-8).

Des couchettes superposées devront laisser un espace d'au moins **0,55** m pour replier les genoux et être décalées d'au moins **0,45** m pour permettre à l'occupant de la couchette inférieure de s'asseoir sur le bord de celle-ci. Souvent, on combinera une couchette inférieure coulissante et une couchette supérieure (couchette de pilote) partiellement repliable pour obtenir des dégagements suffisants tout en offrant, de jour, une banquette de dimensions normales. Attention, en dessinant les couchettes de pilote, que celles-ci ne soient pas coupées par des renforts, des goussets ou des tirants de cadène qui en réduiraient la largeur utile.

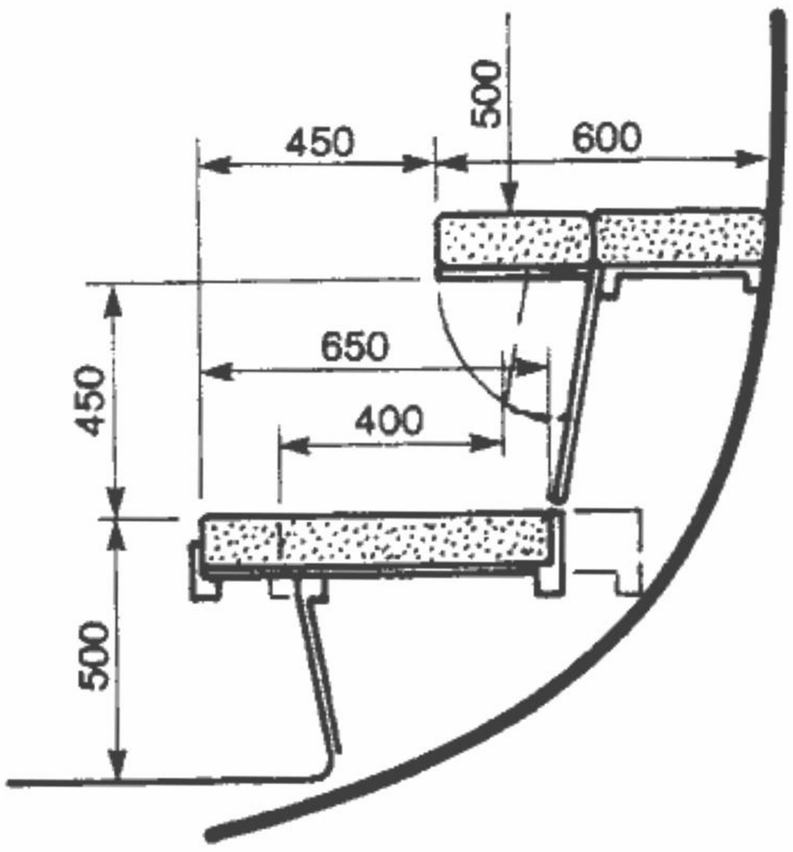


Fig. 7-8 • Couchettes superposées en position « nuit ». De jour, la couchette inférieure rentrée et le bord de la couchette supérieure rabattu transforment le tout en une banquette de carré de dimensions normales.

Lorsqu'un des côtés de la couchette est entièrement dégagé, il ne faudra pas oublier de prévoir une planche ou une toile de roulis qui, hors service, se replieront sous le matelas.

Une planche de roulis doit avoir une hauteur supérieure de **0,25** m au-dessus du matelas.

Les couchettes cercueil que l'on trouve sur les plus petits voiliers, ou la couchette de quart à la place du navigateur, devront laisser une longueur libre d'au moins **0,80** m. La hauteur minimum sera de **0,60** m dans la partie encastrée, et de **0,95** m au dehors (FIGURE 7-9). Une poignée sur le haut de l'ouverture facilitera l'entrée.

Les couchettes de poste avant sont souvent trop étroites au pied et ne laissent pas les hauteurs libres et les surfaces au plancher nécessaires. La FIGURE 7-10 indique ces minimums.

Les couchettes de poste avant, comme parfois les couchettes de quart, sont inclinées par rapport à l'axe longitudi-

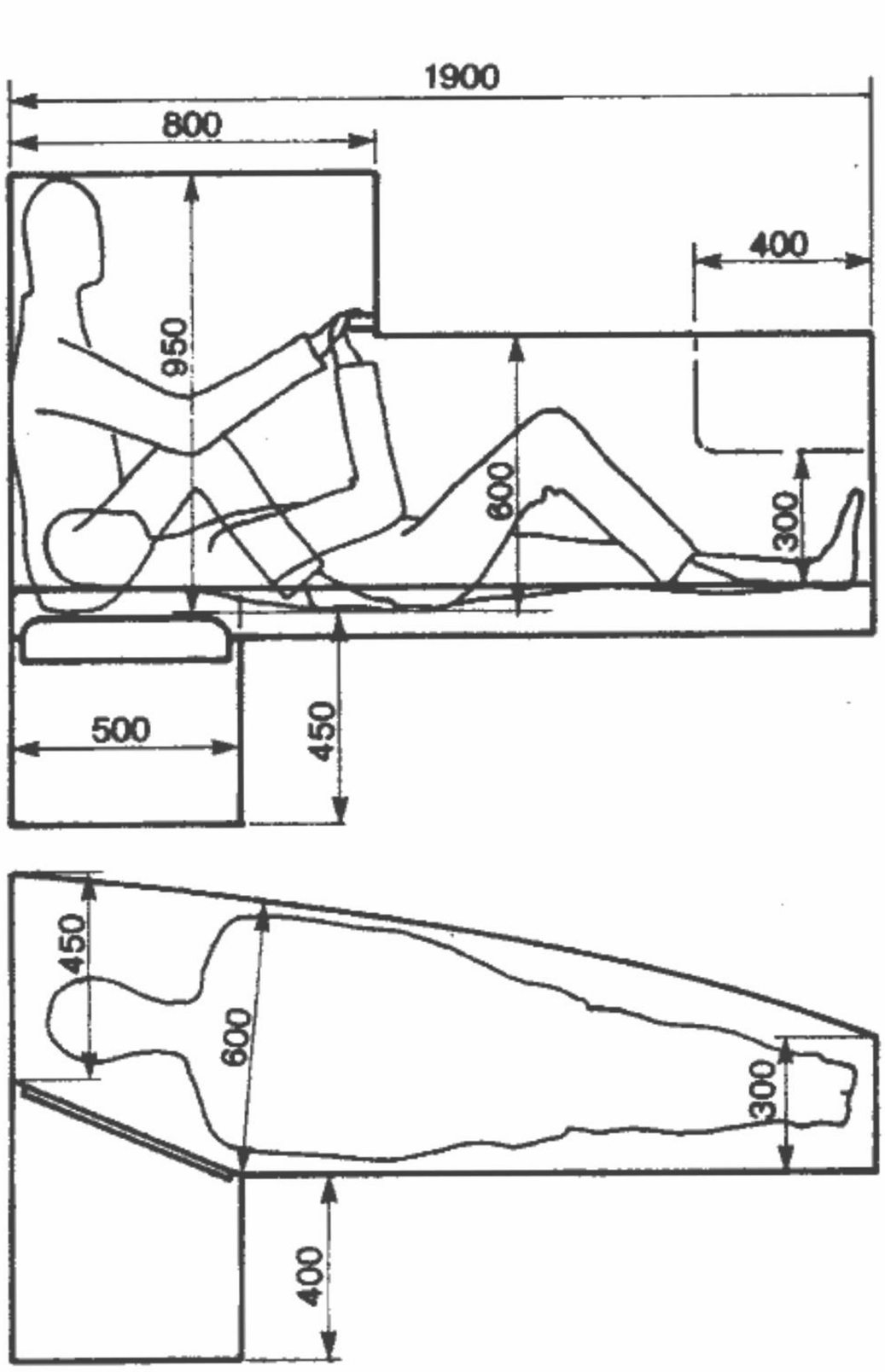


Fig. 7-9 • Dimensions d'une couchette de quart.

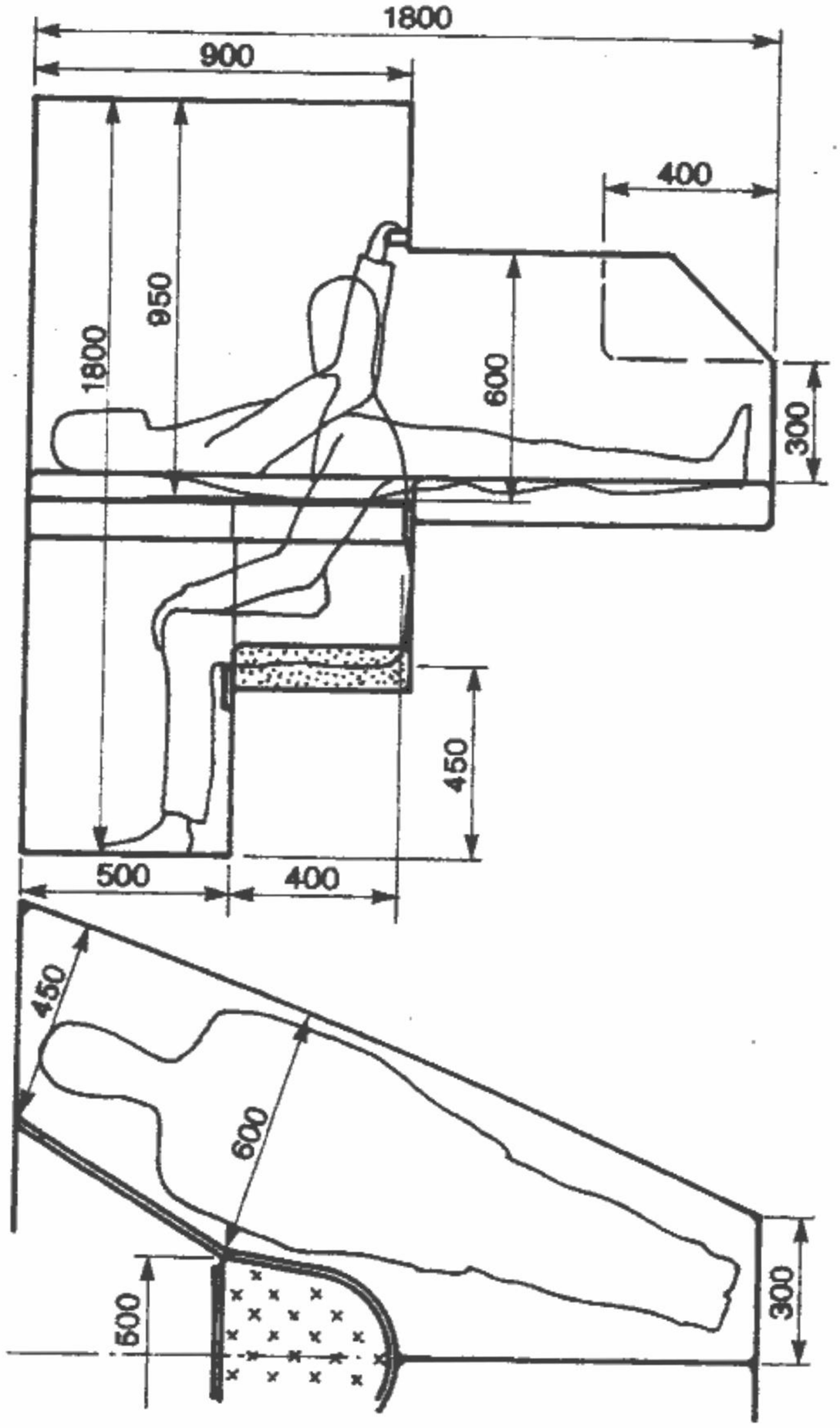


Fig. 7-10 • Dimensions des couchettes de poste avant. Dans cet exemple, compte tenu de la hauteur de la couchette au-dessus du plancher, un siège de hauteur normale est ménagé dans la pointe.

nal de la coque. A la gîte, elles seront donc inconfortables car d'un bord on aura la tête en bas et, de l'autre, on glissera au fond. On ne peut donc pas les considérer comme des couchettes de mer.

Sur les voiliers de course, on trouve parfois des cadres en tube, réglables selon la gîte à l'aide de palans, pour les couchettes de pilote. C'est une excellente solution que l'on devrait utiliser sur les voiliers de croisière. Des cadres simplement rabattables dans le poste avant peuvent offrir un complément de couchage intéressant aux escales. Ils ont l'avantage, en navigation, de libérer le poste avant, pour les sacs à voile par exemple.

Les couchettes double pourront atteindre **1,30** m ou **1,40** m, si l'on prend la précaution de diviser le matelas en deux dans le sens longitudinal et de prévoir une planche de roulis d'au moins **0,35** m de haut venant s'insérer entre les deux parties pour pouvoir les utiliser en mer. La fixation de cette planche doit être très robuste.

Le fond des couchettes doit assurer une bonne aération. S'il est rigide, il sera percé de nombreux trous, mais il peut être également réalisé en lattes de bois souples, en filet ou en sangles transversales ou croisées.

Il est d'usage de considérer l'épaisseur des matelas à 10 cm. C'est un minimum pour de la mousse de polyester, d'autant qu'il en existe de différentes souplesses, la plus rigide étant la plus confortable. On choisira de préférence une mousse résistant au feu.

Les accès au carré et aux cabines au travers des cloisons doivent avoir les dimensions minimums définies sur la FIGURE 7-11.

Les portes fermant ces ouvertures peuvent être battantes ou coulissantes. Les portes battantes sont plus simples, mais plus encombrantes, en raison de leur débattement. Les portes coulissantes ont l'avantage de supprimer celui-ci mais, en revanche, elles condamnent une surface équivalente de cloison à moins de pouvoir les insérer dans une cloison double. Mais c'est là une source d'ennuis car le coffrage n'est pas, ou difficilement, visitable. D'autre part, pour que la porte coulisse librement, il faut qu'elle soit montée sur des ferrures à galets de bonne qualité et incorrodables.

Cette solution n'est guère envisageable que sur de grosses unités. Enfin, une porte battante est plus contrôlable à la gîte. L'une comme l'autre doivent pouvoir être verrouillées dans les deux positions ouverte et fermée mais ces dispositifs ne doivent pas présenter de poignées ou de boutons dans lesquels on risque de se cogner ou de s'accrocher.

Enfin, pour préserver une bonne ventilation, ne pas oublier qu'une porte doit laisser passer l'air en haut et en bas, soit par un jour avec son ouverture, soit par des louvres.

Tous les angles concaves raccordant les parois verticales au plancher seront arrondis, afin de faciliter le nettoyage et de ménager un espace entre les panneaux amovibles et les parois évitant de détériorer celles-ci. On chanfreinera de 10° environ la tranche des planchers pour éviter qu'ils se coincent dans leur logement, et on les divisera en panneaux facilement manipulables.

Le verrouillage de ces panneaux devra être très robuste, si l'espace situé en dessous sert de rangement.

Dans le plancher situé au pied de la descente, on disposera une souille amovible et fermée par un caillebotis afin d'y récupérer facilement les miettes et les autres saletés qui tombent sur le plancher.

Le meilleur matériau pour le plancher est bien sûr le teck en lattes non vernies. Au mouillage, il sera toujours possible de le recouvrir d'une moquette amovible en tissu acrylique, plus agréable aux pieds nus, mais inutilisable en mer à la gîte.

C ▪ CUISINE

Quel que soit l'espace qu'elle occupe, la cuisine doit répondre à deux conditions : commodité et sécurité.

Elle devra être disposée de façon à ne pas entraver la circulation des équipiers et à maintenir le cuisinier à l'écart de celle-ci. La disposition en U est celle qui remplit le mieux ces conditions. Elle ne peut malheureusement s'adapter pleinement que sur des unités de plus de **10** m.

La sécurité du cuisinier doit être assurée quelle que soit la gîte. Pour cela, une barre devra être placée devant le réchaud.

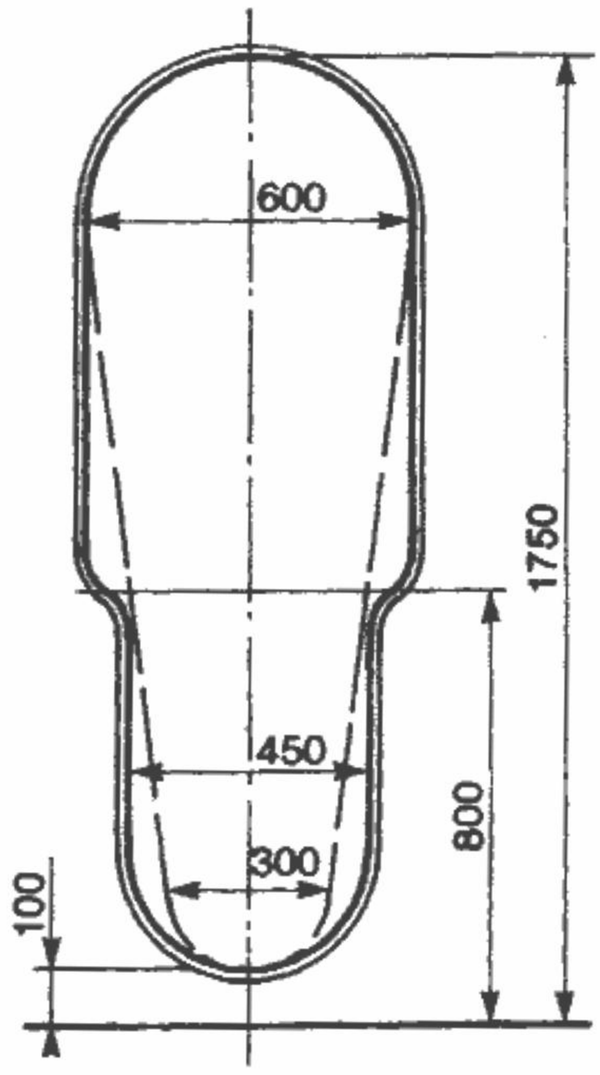


Fig. 7-11 • Dimensions minimums d'une porte de cloison.

Une sangle solide lui fournira un appui postérieur et une main courante au plafond lui permettra de se tenir. Les réchauds sont couverts par la norme ISO 14 895.

Dans toute la mesure du possible, le réchaud sera monté sur une articulation parallèle à l'axe de la coque. Seuls les petits réchauds à gaz à un feu peuvent être montés à la Cardan. L'axe de l'articulation devra se trouver à **75** mm environ au-dessus de la grille de repos des récipients, c'est-à-dire sensiblement à mi-hauteur des liquides qu'ils peuvent contenir, de façon à en réduire les mouvements. Les débattements des petits réchauds seront limités à **30°** dans toutes les directions et les réchauds-fours, articulés seulement au roulis, à **40** ou **50°** de part et d'autre de la verticale. Un système d'amortisseur évitera les chocs trop brutaux en arrivant en butée, et un verrou les fixera en position verticale lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Les fixations des réchauds à bouteille incorporée doivent être facilement amovibles pour effectuer le changement de bouteille à l'extérieur.

Pour un réchaud un feu à la Cardan, on prévoira un trou de **0,33** m et pour un réchaud deux feux Camping-Gaz un écart entre parois de **0,49** m. Avec une bouteille de **3** kg, le rayon de débattement est de **0,45** m.*

Dans un certain espace autour de la flamme du réchaud (FIGURE **7-12**) les matériaux utilisés doivent être difficilement inflammables (**limite A**) puis non propagateurs de flamme (**limite B**) selon la norme ISO 9094-1.2.

* On trouvera au CHAPITRE **9** les dimensions des bouteilles de gaz liquéfié et les recommandations d'installation des circuits de gaz.

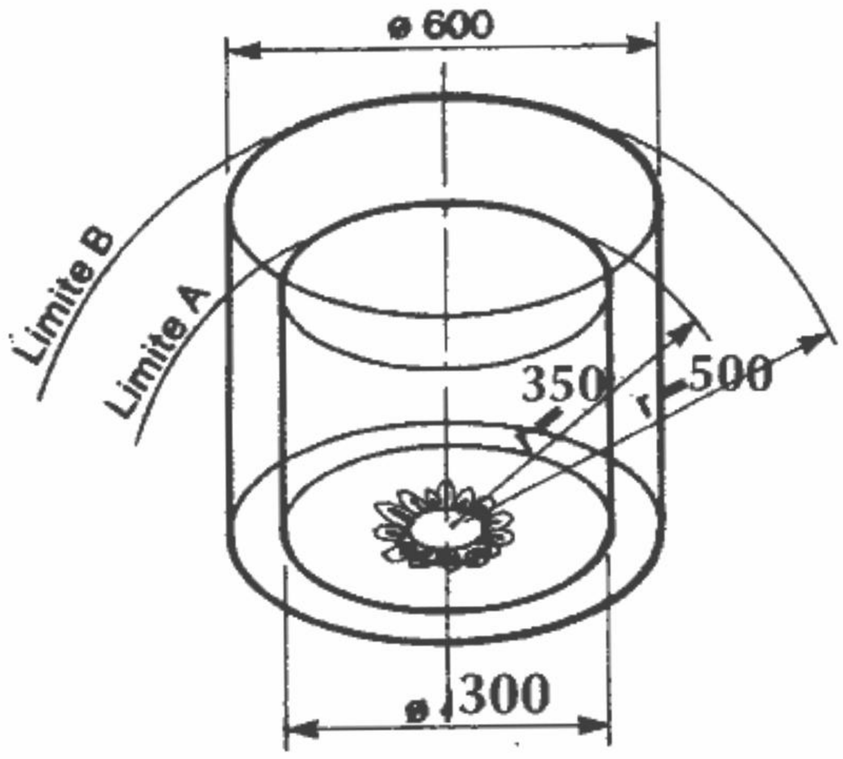


Fig. 7-12 • Limite de protection autour de la flamme d'un réchaud fonctionnant au GPL.

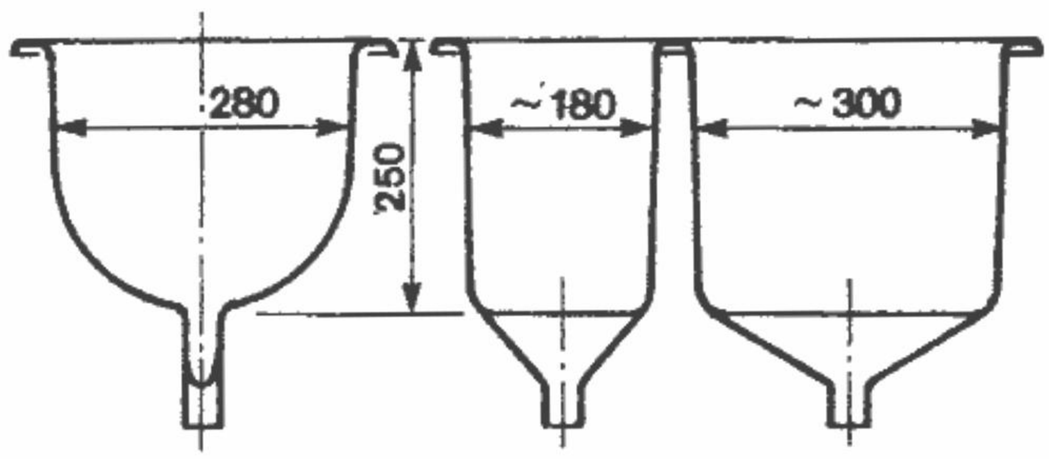


Fig. 7-13 • Vue en coupe transversale et longitudinale d'un évier double réellement adapté à la navigation en mer à la voile.

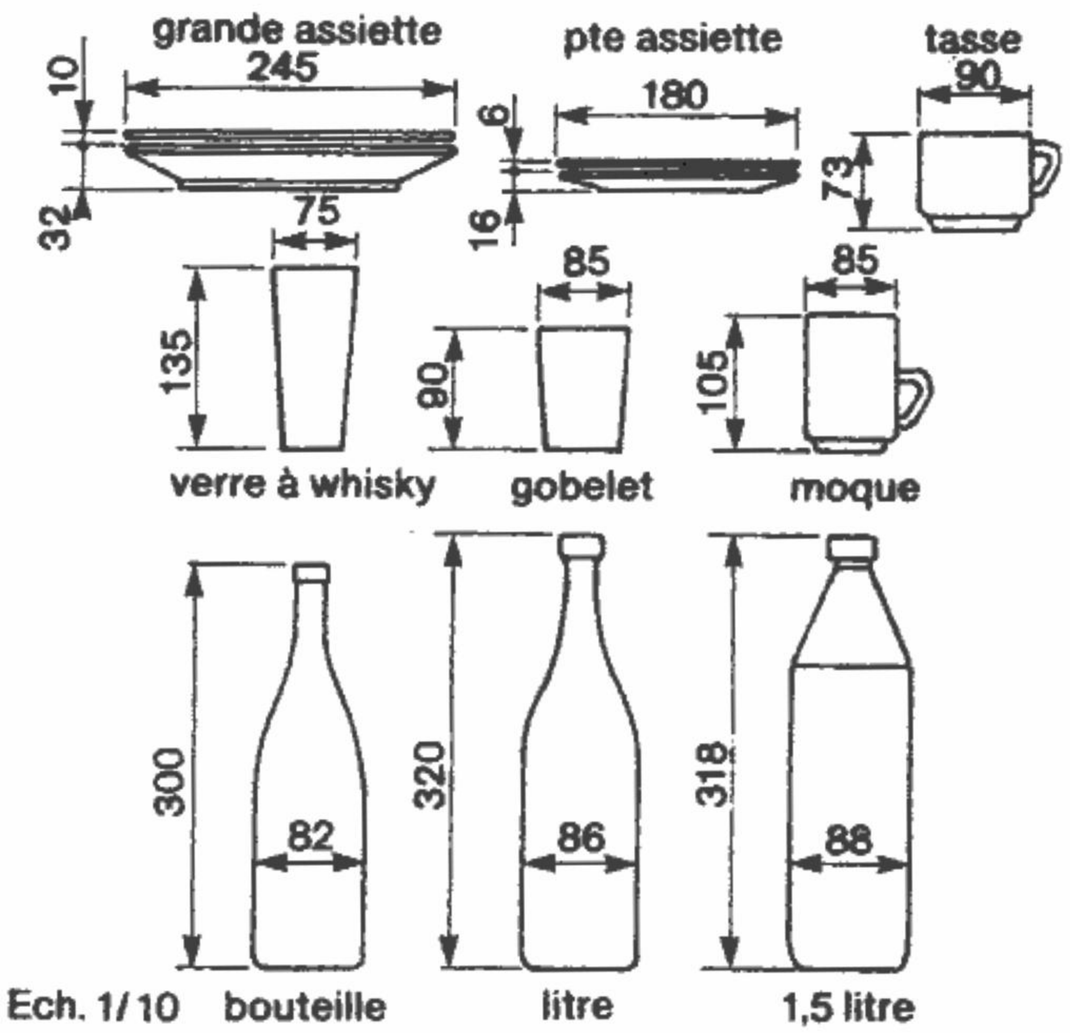


Fig. 7-14 • Dimensions de quelques objets de vaisselle et bouteilles.

En fait, il sera toujours bon de prévoir, au-dessus des réchauds, une surface protégée par une tôle d'aluminium poli et isolée par une couche de matériau ignifuge de **3** mm.

Les éviers seront toujours placés le plus près possible de l'axe de la coque, afin qu'à la gîte il n'y ait pas de risque d'envahissement par le conduit d'évacuation si la vanne de celui-ci est restée ouverte. À noter que celle-ci doit être facile à manœuvrer, c'est-à-dire ne pas être cachée au fond du meuble, ou munie d'une commande à distance.

Je n'ai encore malheureusement jamais vu un bac d'évier réellement étudié pour être utilisable en mer. C'est-à-dire suffisamment profond, mais pas trop large et pouvant se vider jusqu'à 30° de gîte. La FIGURE **7-13** en donne les dimensions. On dispose généralement deux bacs, le plus grand pouvant éventuellement recevoir un séchoir à vaisselle en fil plastifié.

Les glacières ou les réfrigérateurs intégrés s'ouvriront sur le dessus, car l'air froid sera plus lourd que l'ambiant et restera dans la cuve. Les couvercles seront munis d'un joint d'étanchéité et d'une fermeture sans laquelle, sur un coup de gîte, la cuve risquerait de rejeter son contenu.

Pour la même raison, le rangement du matériel de cuisine se fera dans des placards ou des tiroirs dont la façade sera transversale à l'axe de la coque, portes et tiroirs étant, de plus, pourvus de verrous positifs (pas d'aimants ou de clips, sauf à la rigueur pour des portes légères coulissantes).

Les placards parallèles à l'axe seront réservés à la vaisselle qui sera tenue dans des casiers adaptés à ses dimensions. La FIGURE **7-14** donne les cotes d'encombrement de quelques-unes de ces pièces.

Les tiroirs seront divisés en compartiments réservés chacun aux fourchettes, cuillers, grandes et petites, couteaux de table et de cuisine, instruments divers. Le « plafond » des tiroirs, c'est-à-dire la partie fixe du meuble situé au-dessus, devra être de niveau avec l'ouverture sinon on peut être sûr qu'à la gîte un instrument quelconque viendra s'y loger empêchant l'ouverture.

La FIGURE **7-15** donne les principales dimensions des meubles de cuisine. On notera le décrochement à la base de ceux-ci afin de laisser place au bout des pieds, il permet également de protéger les pédales des pompes à pied.

Dans le sens transversal, devant le réchaud, une remontée à **20°** sur au moins **0,20** m permettra de caler les pieds à la gîte.

Le sol sera protégé par un revêtement antidérapant à gros relief large pour être facile à nettoyer.

Le dessus des meubles, en lamifié, pour faciliter l'entretien, sera ceinturé et divisé par des violons de 30 ou 40 mm de haut, afin de retenir les objets qui y seront posés. Les coins intérieurs seront arrondis pour que la saleté ne puisse s'y accumuler et les coins extérieurs seront échancrés pour l'évacuer.

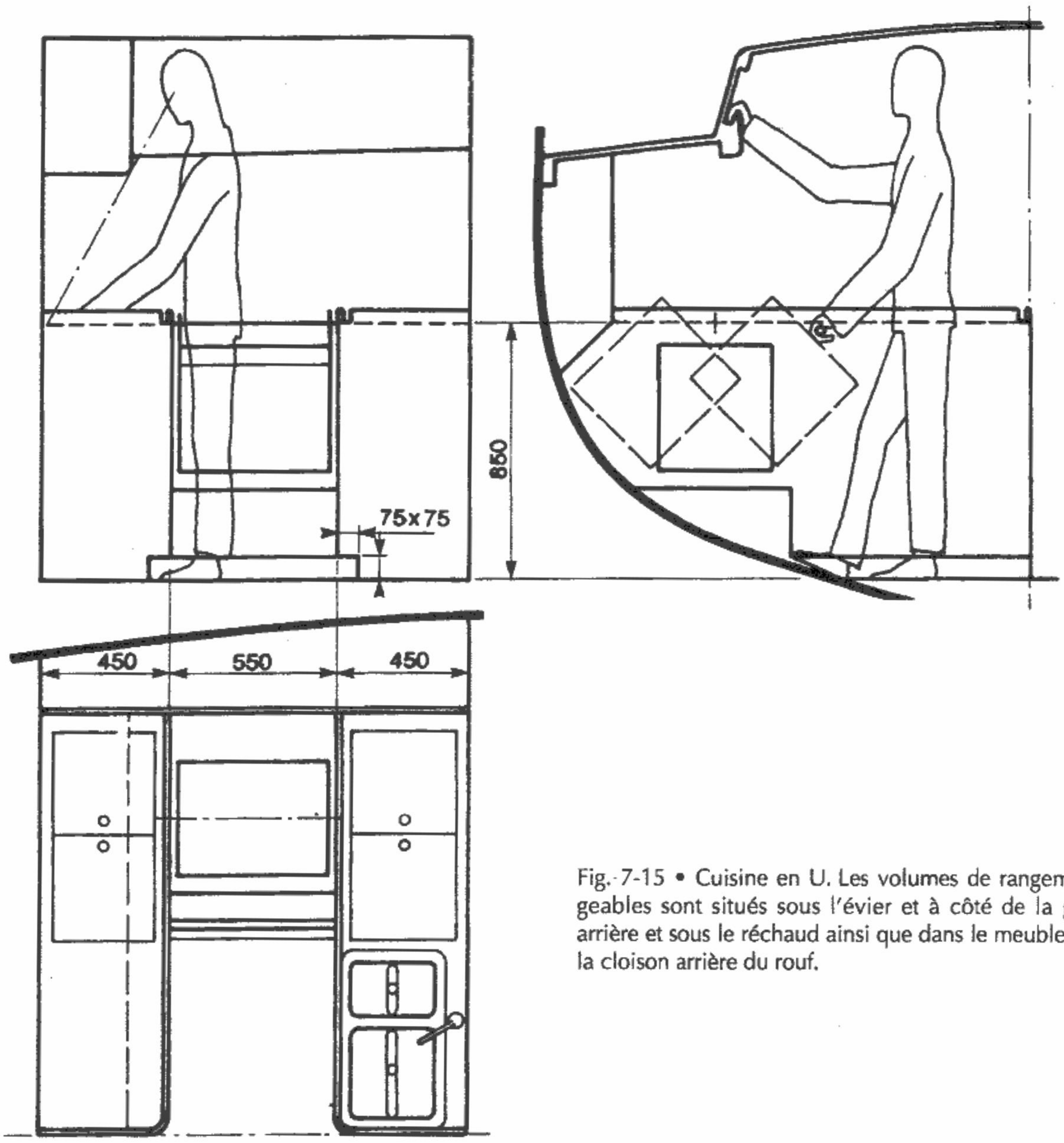


Fig. 7-15 • Cuisine en U. Les volumes de rangement aménageables sont situés sous l'évier et à côté de la glacière, en arrière et sous le réchaud ainsi que dans le meuble haut contre la cloison arrière du rouf.

Deux accessoires seront très utiles : une planche à découper et un vide-ordures. La première pourra servir de couvercle aux éviers ou coulisser sous un plan de travail, mais sera amovible pour son nettoyage. Le vide-ordures sera un panier en plastique recevant un sac poubelle et fixé sur un abattant à côté de l'évier. Une ouverture dans le plan de travail, située au-dessus et fermée par une tape, permettra d'y jeter directement les épluchures ou les miettes.

Il ne faudra pas oublier bien sûr l'éclairage et surtout l'aération avec un ventilateur au plafond et un hublot ouvrant pour le mouillage. Un autre hublot ouvrant sur la paroi arrière du rouf permettra de passer directement les plats aux équipiers du cockpit par mauvais temps.

D ▪ TOILETTES

Ici aussi, la taille du voilier conduira à adopter des dispositions extrêmement diverses allant du simple w.-c., plus ou moins isolé, à la salle de bains avec douche, voire même baignoire.

Dans tous les cas, il serait préférable que ce compartiment soit situé à un endroit du bateau où les mouvements ont la plus faible amplitude.

C'est pourquoi, même sur des voiliers de taille modeste (à partir de **8** m), on le trouve souvent sur le côté de la descente, vers le tiers arrière, à un endroit où, en outre, on dispose plus aisément de la hauteur suffisante.

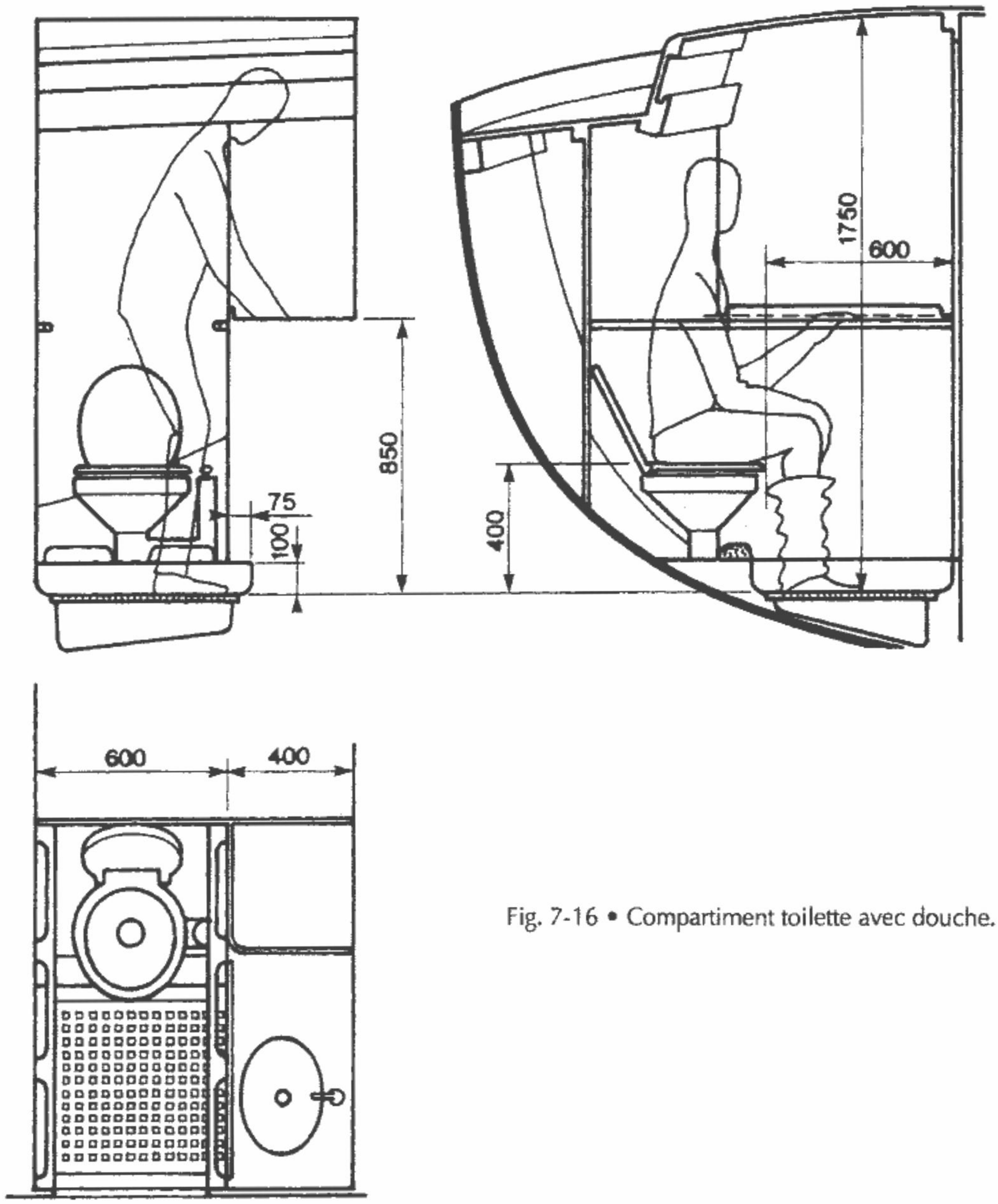


Fig. 7-16 • Compartiment toilette avec douche.

Malgré cela, un certain nombre d'impératifs restent communs à toutes les installations FIGURE 7-16.

La cuvette des w.-c. sera toujours placée selon un axe transversal afin qu'on ne se trouve pas de travers à la gîte. Sa hauteur est généralement faible, de l'ordre de **0,25** à **0,35** m. On la placera sur une plate-forme surélevée pour que le siège se trouve entre **0,40** à **0,45** m du plancher. Un coussinet sur le bord permettra aux équipiers masculins de s'agenouiller, ce qui peut être fort apprécié avec de la mer. Néanmoins, la plate-forme ne doit pas venir trop en avant pour permettre aux pieds de se placer normalement. La largeur entre les parois, situées de chaque côté de la cuvette, ne sera pas inférieure à **0,60** m mais, si elle est nettement plus grande on ne l'écartera pas à plus de **0,35** m de l'une d'elles pour permettre de se tenir à une poignée.

Les vannes d'arrivée d'eau et d'évacuation seront bien sûr facilement accessibles, le mieux étant de les placer de chaque côté de la cuvette.

Le couvercle et l'abattant de celle-ci, lorsqu'ils seront relevés, viendront s'appuyer sur une paroi, afin de ne pas être brisés dès qu'un équipier déséquilibré viendra s'y appuyer.

Le lavabo doit répondre aux mêmes *desiderata* que les éviers, c'est-à-dire être suffisamment profond et de forme adéquate. Les anciens lavabos en porcelaine des wagons-lits étaient très bien étudiés, avec une section de forme parabolique rabattant les remontées d'eau vers le centre de la cuvette. Il est malheureux que l'on ne trouve pas de tels modèles dans le commerce. Son emplacement le plus près possible de l'axe de la coque et l'accessibilité à la vanne d'évacuation répondent aux mêmes impératifs que les

éviers. Le meuble dans lequel il est encastré aura également les mêmes dimensions et le dégagement au pied que ceux de la cuisine. Sur le bord, une main courante permettra de se tenir et de suspendre les serviettes humides.

On remplacera les miroirs en verre, trop dangereux, par des miroirs en plastique que l'on utilise dans les avions, aussi réfléchissants, incassables et plus légers. On pourra ainsi disposer de grandes surfaces qui accroîtront le volume apparent du compartiment. Dans le volume situé à côté du lavabo, un coffre ouvrant sur le dessus recevra un sac poubelle dans lequel sera placé le linge sale. Au-dessus et derrière la cuvette des w.-c., on pourra disposer une armoire à produits de toilette et des volumes de rangement individuels pour le linge.

Dès que le voilier atteint une dizaine de mètres, il est possible de prévoir une douche dans le compartiment toilette. Pour être suffisamment à l'aise, il faut disposer d'une surface à hauteur de coude d'au moins **0,60** x **0,60** m, ceci sans gîte, car avec de la gîte il faudra beaucoup plus de largeur. Deux des côtés seront généralement constitués par les parois du compartiment qui seront revêtues de lamifié et pourvues de poignées. Tandis que les deux autres côtés seront protégés par un rideau de plastique, coulissant sur un rail au plafond et descendant jusqu'au sol.

Celui-ci sera constitué d'un caillebotis en teck ou d'un plancher ajouré dont les trous seront assez petits pour qu'on ne puisse pas s'y coincer les orteils. Le cadre fixe entourant ce caillebotis sera raccordé aux parois verticales par un congé largement arrondi, de même que tous les coins et les angles entre les parois. Le bac de douche s'écoulera dans un réservoir spécial pour eaux usées et non dans la cale où l'odeur, rapidement insupportable, envahirait tout le bateau. Une pompe sera installée pour la vidange de ce réservoir.

Les normes ISO 8099-1, 2 et 3 concernent les systèmes de rétention des eaux usées et les w.-c. à recirculation.

Dès que les dimensions le permettront, on fera ouvrir la porte du compartiment vers l'intérieur de celui-ci et du côté opposé au lavabo. Le surbau, en bas de la porte, sera au moins de **0,15** m s'il y a une douche, et la porte devra comporter les aérateurs habituels.

Une porte coulissante, extérieure au compartiment, peut être plus facilement réalisée du fait qu'elle se trouve dans un plan longitudinal et sur une paroi dégagée.

L'aération est, on le conçoit aisément, très importante et l'on prévoira ventilateur au plafond et hublot ouvrant. L'éclairage artificiel sera assuré au moins par un tube au-dessus du lavabo.

Si un chauffe-eau à gaz est prévu, il devra impérativement être équipé d'un conduit d'évacuation des gaz vers l'extérieur. Ce conduit doit néanmoins pouvoir être obturé par mauvais temps et un avis parfaitement visible sera placé à côté du chauffe-eau indiquant que celui-ci doit être éteint (y compris la veilleuse) avant la fermeture du conduit et qu'il faut s'assurer de son ouverture avant de l'allumer.

E ▪ COIN NAVIGATION

Comme toujours, la taille du voilier offrira des possibilités différentes de disposition soit transversale — la plus courante — soit longitudinale, sur les grosses unités surtout, mais aussi sur les plus petites où bien souvent, c'est la table du carré ou un tiroir coulissant au-dessus d'une couchette qui fera office de table à cartes. L'essentiel de ce module va s'organiser autour de la table à cartes dont le format est lié à celles-ci. Ce format étant, de plus en plus pour les cartes des services officiels le A0 dont les dimensions sont de **1 189** x **841** mm, ce qui plié en deux, donne **841** x **594**. La surface plane utile de la table à cartes devrait donc être normalement d'au moins **0,85** x **0,60** m. Ce devrait être aussi celles des casiers ou tiroirs de rangement.

Sauf sur les petits voiliers, lorsque la table est disposée longitudinalement, le navigateur restera debout ou disposera d'une simple sellette ou d'une sangle solide pour se caler à la contre-gîte. Dans ce cas, le meuble aura une hauteur de **0,80** à **0,85** m et le dessus en sera horizontal. Il sera équipé de tiroirs de rangement et l'on n'oubliera pas le décrochement à la base pour les pieds.

Face à la table transversale, le navigateur sera la plupart du temps assis, ce qui n'est pas la position la plus commode pour travailler en haut de la carte et obligera à incliner celle-ci. Pour qu'elle puisse servir à d'autres usages, l'abattant qui la recouvre et qui permet d'accéder au casier de rangement des cartes, devra pouvoir être tenu solidement relevé en position horizontale.

Les dimensions de l'ensemble devront être soigneusement respectées, en particulier la hauteur entre le siège et le dessous du casier, pour assurer au navigateur le maximum d'aise, le mieux étant de pouvoir travailler assis ou debout. On devra veiller également à ce que la partie engagée sous le passavant soit la moins profonde possible et que la hauteur libre, située au-dessus, soit suffisante pour pouvoir y travailler sans avoir le nez sur la carte. Il pourra d'ailleurs être bon de capitonner l'angle inférieur de l'hiloire pour éviter les bosses !

Sans aller jusqu'à la table articulée que TABARLY avait installée pour la première fois sur *Pen Duick III*, le siège sera de préférence concave, de façon à rester calé à la gîte, et il serait bon qu'il puisse se reculer lorsque l'on doit se lever pour travailler en haut de la carte.

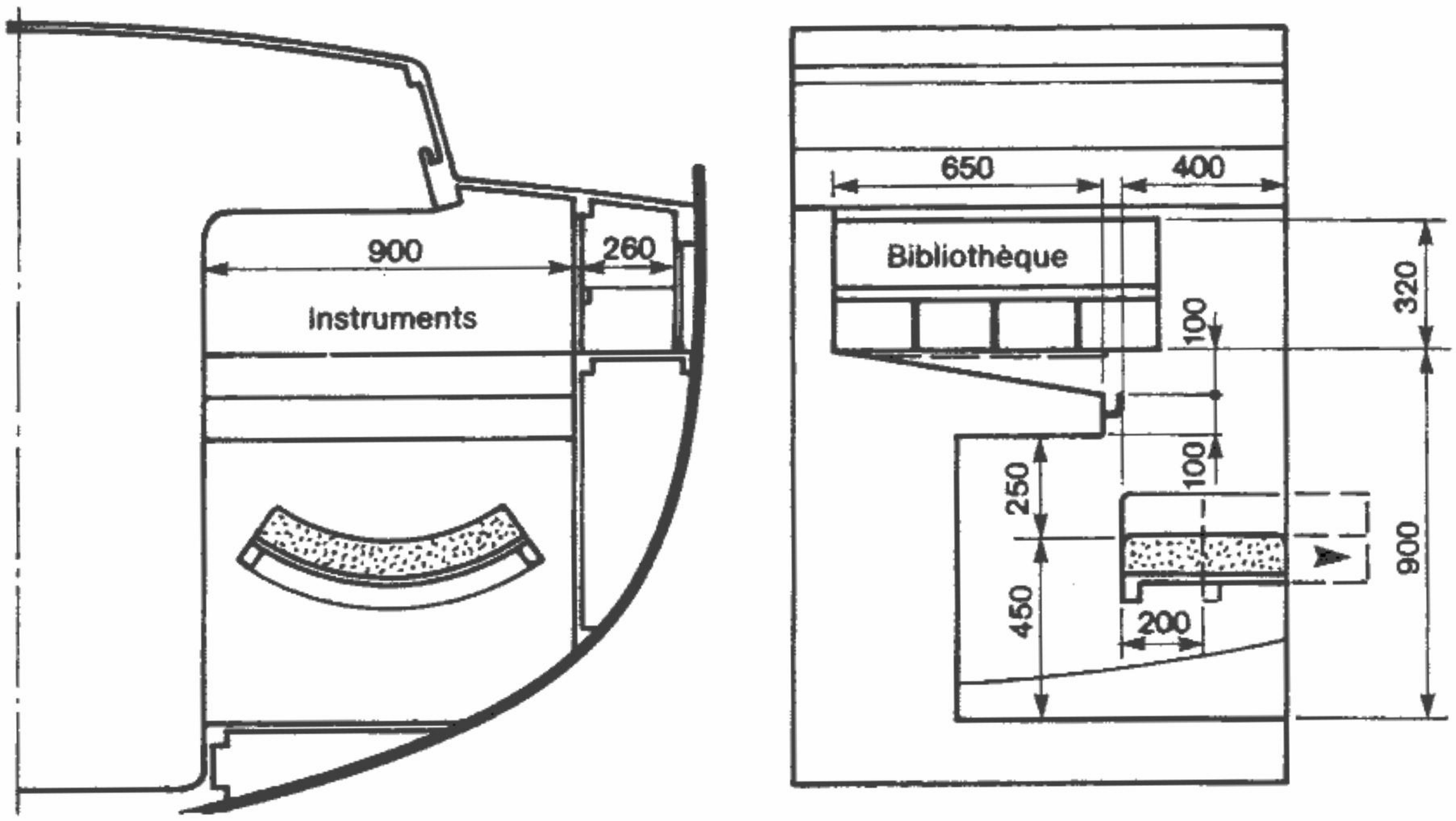


Fig. 7-17 • Coin navigateur. Les volumes sous la table et sous la bibliothèque seront aménagés.

On voit que ceci est peu compatible avec l'utilisation de la tête d'une couchette de quart.

Il est habituel de munir le pourtour de la table de violons destinés à retenir la carte et les petits instruments, mais ils sont très gênants lorsque l'on doit travailler sur le bord et que la règle déborde. C'est pourquoi ces violons devront être amovibles ou remplacés par un auget de **2** ou **3** cm de largeur. La carte sera alors tenue à chaque coin par un petit sandow entourant le plateau de la table et fixé dessous.

Autour de sa table, le navigateur doit avoir à portée de main les ouvrages et les instruments dont il aura besoin. Ces derniers devenant, avec le développement de l'électronique, de plus en plus nombreux, ils requièrent une surface qui devra être largement évaluée et il ne sera possible de réaliser une bonne installation que si tous les instruments sont définis au départ. Pour éviter que les connexions qui relient ces instruments à leurs senseurs ou répétiteurs ne constituent un écheveau dangereusement exposé, il est préférable de les cacher dans un double fond, mais celui-ci doit être facilement accessible. Une bonne solution consiste alors à encastrer ou à fixer les boîtiers des instruments sur un panneau monté sur charnière et placé en avant d'une cloison. On peut également utiliser le principe des racks des armoires métalliques. Il ne faut pas oublier cependant que certains appareils comme les émetteurs-récepteurs de radio demandent une bonne ventilation.

Les petits instruments, crayons, gommes, compas, règles trouveront leur place dans des supports individuels ou dans un plumier aménagé. Sextants et calculatrice auront également leur propre emplacement prévu dans un tiroir tandis que compas de relèvement et jumelles seront placés à portée de main (mais pas à portée de tête !) dans leur support habituel.

Les ouvrages seront rangés dans une bibliothèque dont la profondeur sera de **0,26** m et la hauteur de **0,31** m pour recevoir les plus grands ouvrages, éphémérides nautiques et tables HO. Sur la longueur, elle sera divisée par de petites cloisons espacées de **10** à **15** cm montant à mi-hauteur afin que les livres ne puissent se coucher. Une barre frontale amovible placée à la même hauteur les retiendra. Le fond de la bibliothèque sera bien sûr vaigré pour protéger les livres de la condensation.

Le mal de mer guette toujours le navigateur enfermé dans son coin et, même non déclaré, il est souvent à l'origine des erreurs que l'on commet. C'est pourquoi cet emplacement doit être bien ventilé. D'autre part, le navigateur doit pouvoir communiquer facilement avec le barreur. Cela sera facilité par la présence d'un hublot ouvrant dans la face arrière du rouf.

De nuit, le navigateur est appelé à passer souvent de sa table à l'extérieur, il faut donc que l'éclairage soit adapté à la vision nocturne. Pour cela, la lampe montée au bout d'un flexible sera rouge et un rhéostat permettra d'en régler l'intensité.

F ■ RANGEMENTS

Plus l'espace est réduit, plus les problèmes de rangement deviennent cruciaux et doivent faire appel à l'imagination et à la logique.

Selon les produits ou matériels à ranger, on pourra distinguer :

- ceux qui ne craignent ni l'humidité ni le confinement ;
- ceux qui ne craignent pas l'humidité mais demandent une bonne aération ;
- ceux, enfin, qui craignent l'humidité et le manque d'air.

Les premiers sont représentés essentiellement par les vivres de réserve en boîtes, bouteilles ou emballages étanches. Ils trouveront leur place dans les fonds ou sous les couchettes. Ces volumes, parfois assez vastes, seront divisés afin de limiter les déplacements possibles de la cargaison et des moyens d'arrimage seront prévus car il n'y a rien de plus agaçant que des boîtes de conserve ou des bouteilles roulant à chaque mouvement du bateau.

Parmi les produits ne craignant pas (ou pas trop) l'humidité mais demandant une bonne aération, on trouvera tout d'abord les vivres frais. Pour ceux-ci, le meilleur rangement est constitué par des paniers en plastique ou en fil métallique inoxydable ou plastifié, glissés dans un compartiment largement ouvert. Attention seulement à ce qu'ils soient verrouillés à leur place et qu'une grille placée au ras du dessus empêche le contenu de s'échapper.

Il s'agit aussi des produits dangereux, carburants divers, dégraissants, peintures qui, protégés par leur emballage, peuvent néanmoins être sujets à des fuites ou des émanations créant des risques d'explosion, d'incendie ou d'intoxication. Ils devront être stockés à l'extérieur des emménagements dans des coffres parfaitement isolés de ceux-ci et de toute source de chaleur. Ceux-ci devront répondre aux mêmes prescriptions que les coffres recevant les bouteilles de gaz *; et les récipients devront être solidement arrimés.

Autres objets ne craignant pas l'humidité mais demandant une bonne aération : les vêtements de mer, les cirés et bottes. Un volume spécifique devra leur être consacré à proximité immédiate de la descente. Comme, de plus, ils sont la plupart du temps encombrants, cela ne sera souvent réalisable que sur des unités de grande taille. La hauteur disponible devra atteindre **1,30** m pour un pantalon montant et jusqu'à **1,60** m pour une combinaison. Les bottes, dont la hauteur est de **0,45** m environ, posées à l'envers sur un râtelier, trouveront place sous les vestes (**1** m à **1,10** m).

Pour sécher plus facilement, ces vêtements devront être placés sur des cintres, ce qui entraînera un supplément de hauteur de **0,20** m et nécessitera une profondeur d'au moins **0,50** m.

* Voir CHAPITRE 8.

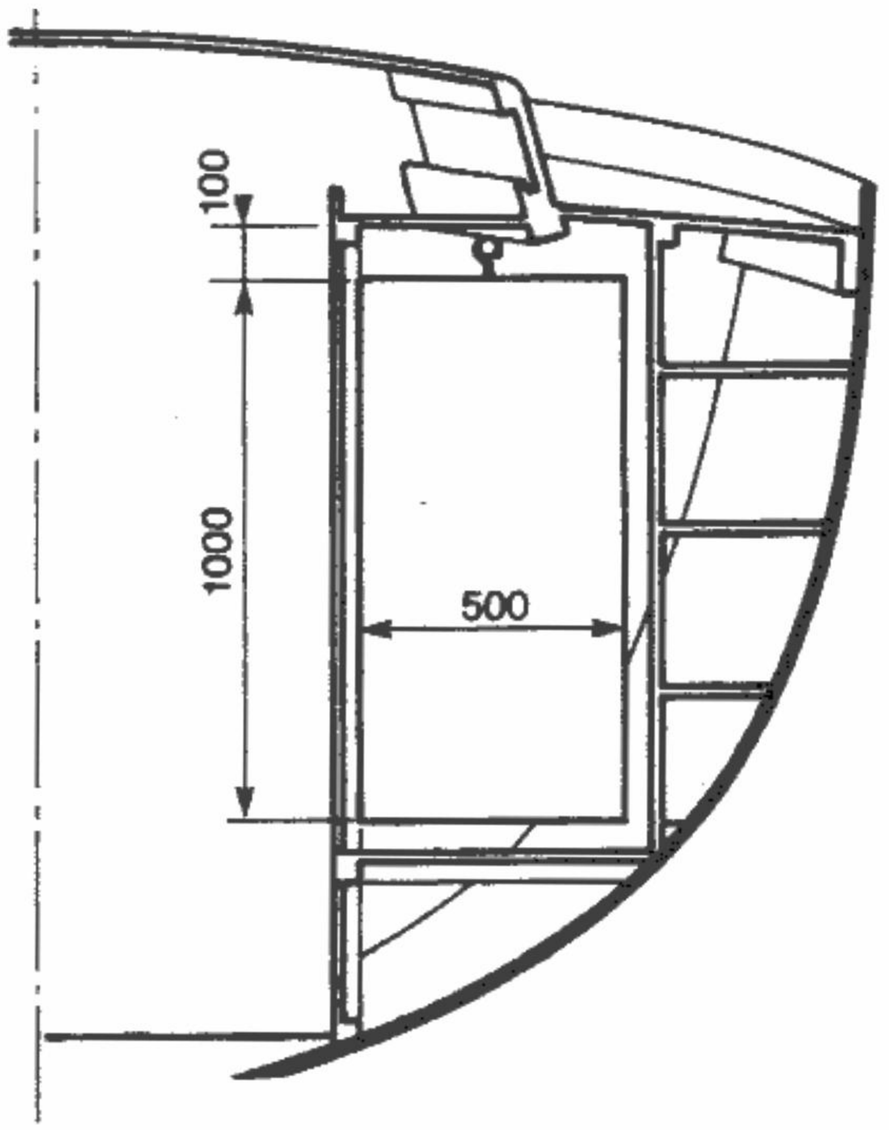


Fig. 7-18 • Penderie pour housses.

La chaleur n'est pas à craindre, à condition qu'elle soit modérée et surtout que les vêtements ne puissent venir au contact d'un point chaud tel qu'une bouche de chaleur par exemple, si le voilier est équipé d'un chauffage.

Les objets qui craignent à la fois l'humidité et le manque d'aération sont représentés essentiellement par les vêtements autres que ceux de mer, les effets personnels, les livres, objets de loisirs, etc.

Pour les vêtements à suspendre, la penderie devra pouvoir recevoir les housses en plastique ou les sacs dans lesquels ils seront protégés. Les hauteurs courantes sont de **1** m et **1,30** m, auxquelles il faut ajouter **10** cm pour la barre d'accrochage, pour une profondeur de **0,50** m et une largeur variable de **0,25** à **0,40** m (FIGURE **7-18**). Elles seront immobilisées pour éviter toute usure par frottements consécutifs aux mouvements du bateau.

Des tiroirs seront nécessaires pour les vêtements rangés à plat, chemises, pull-overs, sous-vêtements, etc. Le fond de ceux-ci devra être perforé et l'ensemble de la penderie sera vaigré. La porte sera largement ajourée en haut et en bas pour laisser l'air circuler librement.

En dehors de quelques objets que l'on désire conserver immédiatement sous la main et qui pourront trouver place dans des équipets ouverts, ou des livres qui seront placés dans des rayonnages analogues à ceux décrits pour les ouvrages du navigateur, la majorité des objets devront être rangés dans des équipets fermés.

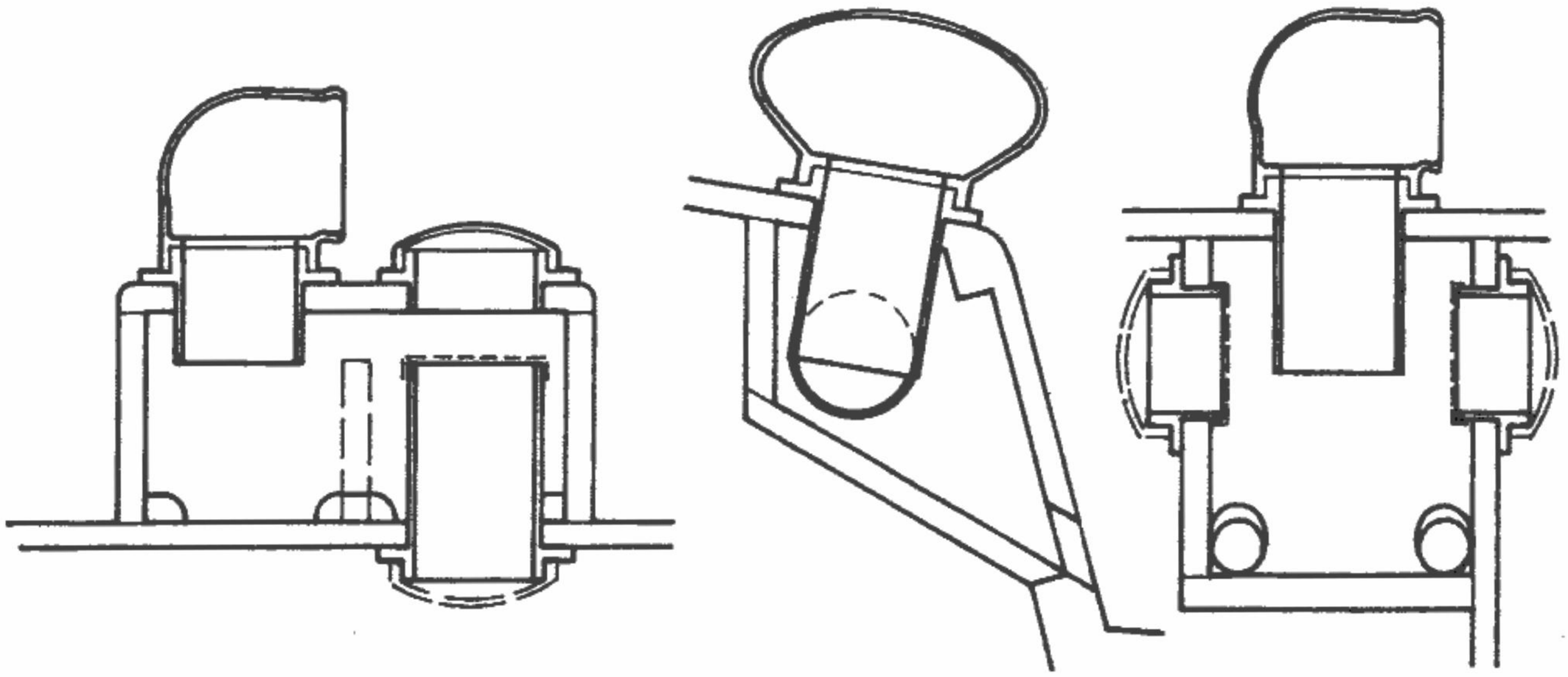


Fig. 7-19 • A gauche, aérateur type Dorade. Une autre embase de manche à air est prévue au-dessus du conduit intérieur pour un montage en direct lorsqu'on est au port. Le conduit intérieur est équipé d'une moustiquaire et d'un bouchon. A droite, aérateur intérieur donnant sur deux compartiments. Les sorties seront équipées d'une moustiquaire et d'un bouchon.

Ceux-ci sont vaigrés, leur fond perforé et les portes pourvues de trous d'aération. Une solution très efficace et agréable à l'œil consiste à réaliser la porte dans un cadre fermé par un cannage. Les fermetures de ces portes seront toujours positives (sauf pour les portes coulissantes) et l'on rejettera systématiquement celles qui sont dissimulées derrière un trou à travers lequel il faut passer le doigt. Elles sont responsables de trop de doigts cassés.

Néanmoins, elles ne doivent pas être trop proéminentes, ce qui serait aussi dangereux et pourrait inciter à s'y retenir sur un coup de gîte. Les étagères intérieures seront munies d'une bordure de quelques centimètres pour retenir les petits objets.

D'autres objets nécessiteront des rangements spécifiques. C'est, par exemple, le cas de l'outillage et des pièces de rechange diverses. Toutes ces pièces craignant la rouille devront être abondamment graissées. Un certain nombre de tiroirs leur seront donc réservés et au besoin aménagés pour recevoir des caisses à outils et des boîtes à casiers.

Sur les plus grandes unités, un coin atelier avec établi pourra être aménagé.

Le rangement des voiles est un des points noirs de la plupart des voiliers de course, comme de croisière. Pour ces derniers, deux systèmes peuvent être employés. Si le poste avant est libre de couchettes, ce sera l'endroit idéal, mais un coffre dans le cockpit permettra de placer en attente un ou deux sacs correspondant à des voiles dont on peut avoir besoin rapidement, ou celle que l'on viendra de retirer, ce qui évitera de devoir traverser tout le bateau en catastrophe si une réduction rapide s'impose ou d'y traîner une voile mouillée.

L'ouverture de ce coffre sera assez grande pour offrir un passage facile des sacs et son fond sera muni d'une claie afin qu'une voile mouillée posée en vrac puisse y sécher plus facilement. Quelques pitons permettront d'attacher les glènes des écoutes.

Si le poste avant n'est pas libre, tous les sacs devront trouver place dans le coffre du cockpit dont le volume deviendra bien sûr plus important ou, ce qui est mieux, dans plusieurs coffres indépendants.

G ▪ AÉRATION

Tout au long de ce chapitre, nous avons insisté sur l'importance de la circulation de l'air à l'intérieur du bateau, encore faut-il que cet air puisse trouver son chemin vers l'extérieur, tant pour entrer que pour sortir. Ceci est indispensable même sur les plus petits voiliers, pour la qualité de la vie à bord et la durée de la coque et des équipements. Mais, cet aspect est malheureusement trop souvent sacrifié par les chantiers.

Il est bon de se souvenir que la respiration d'une personne dégage à elle seule **50** g de vapeur d'eau par heure et qu'ainsi deux personnes saturent un local de **30** m^3 en moins de **5** heures à **15°**. A **5°**, il faudra trois fois moins de temps.

Les panneaux de pont qui doivent rester fermés lorsque le bateau est sans occupant ou que le temps ne permet pas de les ouvrir ne peuvent constituer qu'un élément d'appoint, et un circuit d'air permanent doit impérativement être prévu.

Ce circuit doit comporter des entrées et des sorties dont le rôle pourra être inversé selon l'orientation du vent relatif.

La principale difficulté de réalisation des aérateurs réside dans le fait qu'ils doivent laisser entrer l'air mais pas les embruns ni la pluie. Les seuls systèmes valables sont donc ceux à chicanes, qu'ils constituent un ensemble autonome comme les aérateurs Tannoy ou Dorade * ou soient intégrés à la construction. La FIGURE 7-19 représente le principe du modèle d'origine et un exemple de son application à un aérateur intégré. Pour être efficaces, le diamètre des conduits doit être d'au moins **100** mm. Une manche à air orientable doit être placée sur l'entrée et celle-ci et (ou) le conduit intérieur doivent pouvoir être obturés. Ce dernier sera également pourvu d'une moustiquaire. La section totale des trous d'évacuation doit être au moins égale à celle du conduit. Les aérateurs seront disposés par paire soit longitudinalement (avant et arrière), soit transversalement (sur les deux côtés du rouf).

Les coffres isolés des emménagements ne pourront bénéficier de la circulation d'air générale et il sera parfois nécessaire de leur assurer une aération spécifique par des louvres ou des aérateurs en haut des hiloires et par une communication entre les deux bords, à la base.

H ▪ DÉCORATION INTÉRIEURE ❋ ❋ ❋

Sans vouloir jouer les stylistes, l'architecte doit être capable de concevoir ou de conseiller une décoration intérieure adaptée au goût du futur propriétaire et au programme du voilier. S'agissant de goûts et de couleurs, l'approche sera forcément personnelle mais il existe néanmoins un certain nombre de règles de base qui éviteront des erreurs grossières. Il est bien évident qu'en l'occurrence, la réflexion ne pourra guère s'exercer sur les volumes, leurs proportions ou leur équilibre, car ils sont par trop tributaires de considérations pratiques, structurelles et fonctionnelles. On remarquera cependant que la symétrie des volumes apporte calme et équilibre tandis que la dissymétrie entraînera tension et malaise. D'autre part, en limitant les volumes en hauteur de façon à laisser visible le haut de la coque, on préservera le maximum d'espace visuel.

Cette réflexion concernera donc essentiellement l'apparence que l'on voudra donner à ces volumes par le jeu des couleurs et des lignes.

On soulignera les lignes horizontales pour allonger les surfaces et reposer l'œil, tandis que les lignes verticales accroîtront l'impression de hauteur au détriment de la largeur et donneront du dynamisme.

Éviter surtout les lignes croisées, les carrés qui procurent une impression de tension qui peut devenir angoissante.

Les couleurs sombres, les grandes surfaces de bois verni foncé rapetissent le volume, surtout si l'éclairage est faible. En revanche, elles reposent l'œil lorsque l'éclairage est violent. Elles sont donc bien adaptées à des intérieurs éclairés par de grandes baies et dans les régions très ensoleillées, mais on préférera les vernis satinés aux brillants.

Dans les régions moins ensoleillées, les intérieurs clairs réfléchiront et diffuseront la lumière qui provient toujours, dans un intérieur de voilier, d'une multitude de sources. Ils donneront de plus une impression d'espace élargi. Mais pour ne pas aplatir les volumes et perdre tout relief, les différents plans des cloisons et des parois seront soulignés de bordures en bois verni ou de filets peints. De plus, on n'utilisera jamais le blanc pur, trop « médical », et l'on évitera les peintures brillantes aux reflets violents. D'autre part, dans la même recherche d'espace visuel qu'avec la répartition verticale des volumes, on respectera un étagement des couleurs partant des plus sombres au sol vers les plus claires au plafond.

Les couleurs des tissus des coussins ou des rideaux doivent bien sûr être assorties à celles de l'intérieur. Les couleurs chaudes, brun, roux, beige, supporteront mieux les couleurs froides des éclairages septentrionaux, mais le jaune virera au vert. Plus on descendra vers le sud, plus il sera facile d'adopter des couleurs froides et denses.

Un intérieur de couleur claire réfléchira celle des tissus, il faudra se méfier des blancs cassés, du jaune ou du rouge avec des couchettes bleues, le reflet prendra une dominante verte ou mauve. Avec des tissus rouges, le blanc deviendra rose.

Les couleurs qui conviennent le mieux sur un voilier sont le brun, le rouge, certains verts tirant sur le bleu, le blanc. Le bleu est reposant et tranquillisant, le vert est frais, le rouge est statique et donne une impression de tension.

Pour les tissus, on évitera les grands motifs ou les chamarrés et ce d'autant que les surfaces sont petites et leur environnement chargé. Par contre, la tache de couleur vive et contrastée d'un coussin ou d'une tapisserie rompra la monotonie d'une surface unie ou d'un motif diffus. Mais la discrétion doit rester de rigueur et le nombre de ces points d'attraction de l'œil réduit au minimum.

La matière et la texture des tissus auront leur importance dans la décoration surtout par leur qualité à supporter les traitements sévères et leur toucher. La laine ou le coton traités, les acryliques réuniront le mieux ces qualités. Le style « yacht », bois verni, blanc et bleu n'est plus aujourd'hui systématique, même s'il reste classique et bien d'autres accords de couleurs sont possibles.

On évitera cependant les couleurs ou les oppositions criardes, souvent responsables du mal de mer. ⚓

* Attention, *Dorade* n'est pas une marque mais le nom du premier voilier, dessiné par O. STEPHENS sur lequel ils furent installés.

8

ÉQUIPEMENT

AUJOURD'HUI, l'équipement d'un voilier tend de plus en plus à se rapprocher de celui d'une habitation terrestre. Malheureusement, les conditions particulières du milieu marin créent des contingences techniques sans aucune mesure avec celles habituelles et, pour chaque type d'équipement, il est nécessaire de faire appel à des matériaux ou des installations spécifiques.

Ici encore, un certain nombre de normes concernent l'électricité, le gaz, l'eau et la lutte contre l'incendie.

A ▪ ÉLECTRICITÉ

C'est sans doute dans ce domaine que les remarques préliminaires s'appliquent le plus. Le nombre des instruments et des appareils utilisant l'électricité ne cesse de se développer, augmentant sans cesse les besoins en énergie électrique et demandant des installations de plus en plus sophistiquées. On constate malheureusement trop souvent que la qualité de celles-ci ne progresse pas à la même vitesse. L'architecte doit donc être conscient de l'importance des spécifications qu'il fournira afin de ne pas laisser au constructeur une initiative trop large dans un domaine qu'il ne maîtrise pas toujours parfaitement.

Les normes suivantes sont à respecter :

ISO 8846 : protection contre l'inflammation des gaz environnants.
ISO 8849 : pompes de cale électriques.
ISO 9097 : ventilateurs électriques.
ISO 10133 : installations à très bas voltage.
ISO 10134 : protection contre la foudre.
ISO 13297 : installations à courant alternatif.

1 RAPPEL DE QUELQUES DÉFINITIONS

À l'exception de très grosses unités, le courant électrique utilisé à bord est le courant continu à très basse tension (< 50 V), nous ne considérerons donc que les définitions qui le concernent. Nous avons vu au chapitre sur la corrosion que, par convention, on admet que le courant va du pôle positif au pôle négatif dans le circuit extérieur au générateur.

L'intensité du courant **I**, c'est-à-dire la force électrodynamique qu'il développe, s'exprime en ampères (**A**).

La quantité d'électricité transportée par un courant s'exprime en ampères-heure (**Ah**).

La chute de potentiel **U**, entre les deux bornes d'un consommateur de courant, définit une différence de potentiel (**d.d.p.**) ou tension électrique qui se mesure en volts (**V**).

La puissance correspondante **P**, est le produit de l'intensité par la **d.d.p.**, **P = U . I**, qui s'exprime en watts (**W**).

Quant à l'énergie fournie par un générateur ou consommée par un appareil, elle se mesure en joules (**J**) correspondant à la puissance en watts par seconde.

Plus couramment, on utilisera le wattheure (**Wh**) égal à 3 600 joules.

Enfin, tout conducteur offre une résistance au passage du courant, variable selon sa nature et ses dimensions.
Cette résistance $\mathbf{R} = \rho \cdot \mathbf{l/s}$, avec :
R : résistance en ohms (Ω) ;
ρ **:** résistivité du conducteur en **Ωm ;**
1 *:* longueur du conducteur ;
s : section du conducteur.

La loi d'OHM définit la différence de potentiel en fonction de l'intensité du courant et de la résistance du conducteur : $\mathbf{U = R \cdot I}$

Des résistances montées en série, c'est-à-dire en succession, s'ajoutent : $\mathbf{R_t = R_1 + R_2 ... + R_n}$ tandis que pour des résistances montées en parallèle, on a :

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \ldots + \frac{1}{R_n}$$

2 CHOIX DE LA TENSION

La quasi totalité des voiliers sont équipés aujourd'hui en **12** V pour la simple raison que le matériel très basse tension que l'on trouve dans le commerce en France, des batteries aux éclairages, est prévu pour cette tension.

Or, il serait intéressant, au niveau des circuits, d'utiliser des tensions plus élevées comme le **24** V ou le **32** V car les pertes dans les conducteurs et les contacts seraient diminuées, ce qui permettrait de réduire la section des premiers (VOIR CHAPITRE **7**) et d'augmenter la fiabilité des seconds.

3 BILAN ÉLECTRIQUE

La première chose à connaître avant de concevoir une installation électrique est le besoin, aussi proche que possible de la réalité, en courant électrique. Pour cela, on établira une liste de tous les appareils avec leur consommation horaire et leur durée d'utilisation en **24** h, on en tirera leur consommation unitaire et totale en **24** h. Le TABLEAU **8/I** ci-dessous en donne un exemple.

La capacité de la batterie sera au moins égale à **1,4** fois la quantité nécessaire, soit dans notre exemple :
76 x **1,4** = **106,4** Ah. On pourra donc prendre une batterie Valéo ou Fulmen de **105** Ah.

Pour la batterie de démarrage du moteur, le calcul sera différent, car le choix sera déterminé en priorité par le courant d'appel du démarreur. On choisira donc celle-ci en fonction de l'intensité maxi admissible sur **5** mn en prenant un coefficient **3** par rapport à la puissance indiquée pour le démarreur.

TABLEAU 8/I
EXEMPLE DE BILAN ÉLECTRIQUE D'UN VOILIER DE 11 m

Appareils	Puissance	Durée d'utilisation journalière	Consommation sur 24 h
Feu tricolore (sous voile) *	10 W	8 h	80 Wh
Projecteur de mât	35 W	3 h	105 Wh
Éclairage compas	5 W	8 h	40 Wh
Table à cartes	6 W	1 h	6 Wh
Éclairage carré	20 W	3 h	60 Wh
Veilleuses couchettes	4 x 6 W	1 h	24 Wh
Éclairage cuisine	20 W	2 h	40 Wh
Éclairage toilettes	6 W	1 h	6 Wh
Récepteur radio	3 W	4 h	12 Wh
Girouette anémomètre	0,2 W	24 h	4,8 Wh
Sondeur	3 W	1 h	3 Wh
Pilote automatique	40 W	12 h	480 Wh
Eau sous pression	36 W	1/6 h	6 Wh
Chauffage	40 W	1 h	40 Wh
Ventilation	6 W	1 h	6 Wh
			912,8 Wh

Soit, en 12 V, une quantité d'électricité consommée de 76 Ah sur 24 heures.

* On ne compte pas les feux de navigation utilisés lors de la marche au moteur, bien qu'ils consomment plus que le feu tricolore, car la batterie est alors en charge. De même, on ne tient pas compte du feu de mouillage utilisé en alternance avec les feux de navigation et qui a la même puissance.

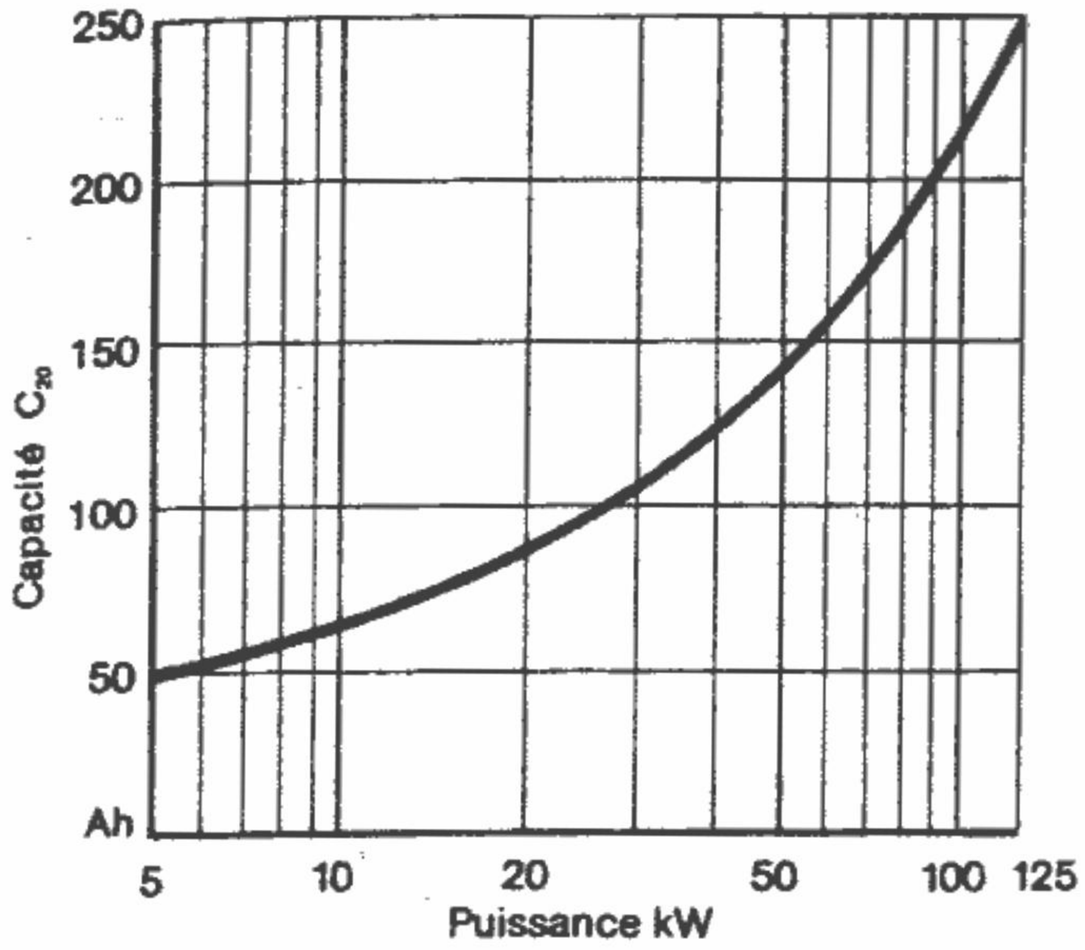


Fig. 8-1 • Capacité C_{20} des batteries de démarrage en fonction de la puissance des moteurs diesel.

Prenons un exemple :

Le Nannidiesel 4.180 de **31** kW est équipé d'un démarreur de **1,8** kW soit **150** A. Avec un coefficient **3**, il faudra que la batterie puisse fournir une intensité sur **5** mn de **450** A. Ce qui correspondrait environ à une capacité de **120** Ah sur **20** h.

La courbe de la FIGURE **8-1** donne, à titre indicatif, la capacité moyenne C_{20} de la batterie en fonction de la puissance des moteurs diesel.

Pour un moteur à essence, la capacité pourra être inférieure de **30** à **40** % environ.

Lorsque la capacité devient élevée, on se trouvera parfois dans l'impossibilité de trouver une batterie assez grosse et sa manipulation risque de présenter de sérieuses difficultés. On sera alors amené à fractionner la capacité en plusieurs batteries montées en parallèle et constituant un parc. Cette solution est cependant à éviter dans toute la mesure du possible. On verra le câblage de ces batteries au paragraphe suivant.

4 CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Sur un voilier, l'énergie électrique est conservée par les batteries d'accumulateurs. Celles-ci ont fait de grands progrès ces dernières années par l'adoption de nouveaux alliages de plomb, de bacs en matière plastique (polypropylène) incassables et plus légers et l'on a vu apparaître des modèles dits étanches et sans entretien, ne présentant pas de risque de déversement d'électrolyte et ne nécessitant qu'un contrôle épisodique ou nul de celui-ci. Ces batteries semblent donc tout indiquées pour l'usage à bord des voiliers. Cependant, il est apparu que si l'on descend en deçà d'un certain niveau de décharge (qui se situerait autour de 75 %) la recharge ne s'effectue plus totalement à chaque cycle et baisse régulièrement jusqu'à rendre la batterie inutilisable. Des progrès sont à venir sur ce plan et, en attendant, il faudra veiller à ne pas descendre en dessous de la décharge maximum autorisée.

D'autres types de batteries peuvent être utilisés : à électrolyte gélifié (ne convient pas pour le démarrage des moteurs) ou alcalines (cadmium-nickel). Leur prix est plus élevé que celui des batteries au plomb sans entretien dont elles ont les mêmes avantages avec, en plus pour les alcalines, une plus grande aptitude à supporter des cycles charge-décharge rapides et de grande ampleur.

La capacité nominale d'une batterie est généralement donnée pour une décharge étalée sur **20** h, c'est la capacité C_{20}. On indique parfois aussi une capacité sur **10** h, C_{10}. Il est nécessaire également, pour les batteries de démarrage, de connaître l'intensité maxi sur **5** mn et l'intensité maxi admissible sur **1** sec.

Les batteries (à l'exception de celles à électrolyte gélifié) doivent être placées dans un bac étanche pour retenir les débordements éventuels d'électrolyte. Il sera doublé de plomb, en résine armée ou en matière plastique résistant aux acides pour les batteries classiques, en acier ou en matière plastique résistant aux bases pour les batteries alcalines.

On ne le placera surtout pas dans le compartiment moteur où la chaleur dégagée serait on ne peut plus néfaste aux performances des batteries et à leur durée de vie, pas plus qu'à proximité des réservoirs à combustible où une étincelle pourrait provoquer explosion ou incendie. Néanmoins, les batteries seront situées le plus près possible du moteur pour la batterie de démarrage, et du tableau principal pour celle de servitude afin de réduire la longueur des conducteurs devant transporter de fortes intensités.

Une ventilation sera prévue pour permettre l'évacuation de l'hydrogène dégagé en fin de charge. Elle devra déboucher à l'extérieur si la capacité des batteries logées dans le même compartiment dépasse **2 000** W/h.

Il est toujours tentant de placer aussi bas que possible le poids des batteries, néanmoins il ne faudra pas oublier qu'elles ne supportent pas l'eau, ce qui interdit de les placer dans les fonds, afin qu'en cas d'envahissement, elles restent protégées le plus longtemps possible pour pouvoir démarrer le moteur, les pompes, et au besoin lancer un appel radio.

Les batteries sont lourdes et leur fixation doit être parfaitement assurée pour éviter tout désarrimage en cas de forte mer ou de chavirage.

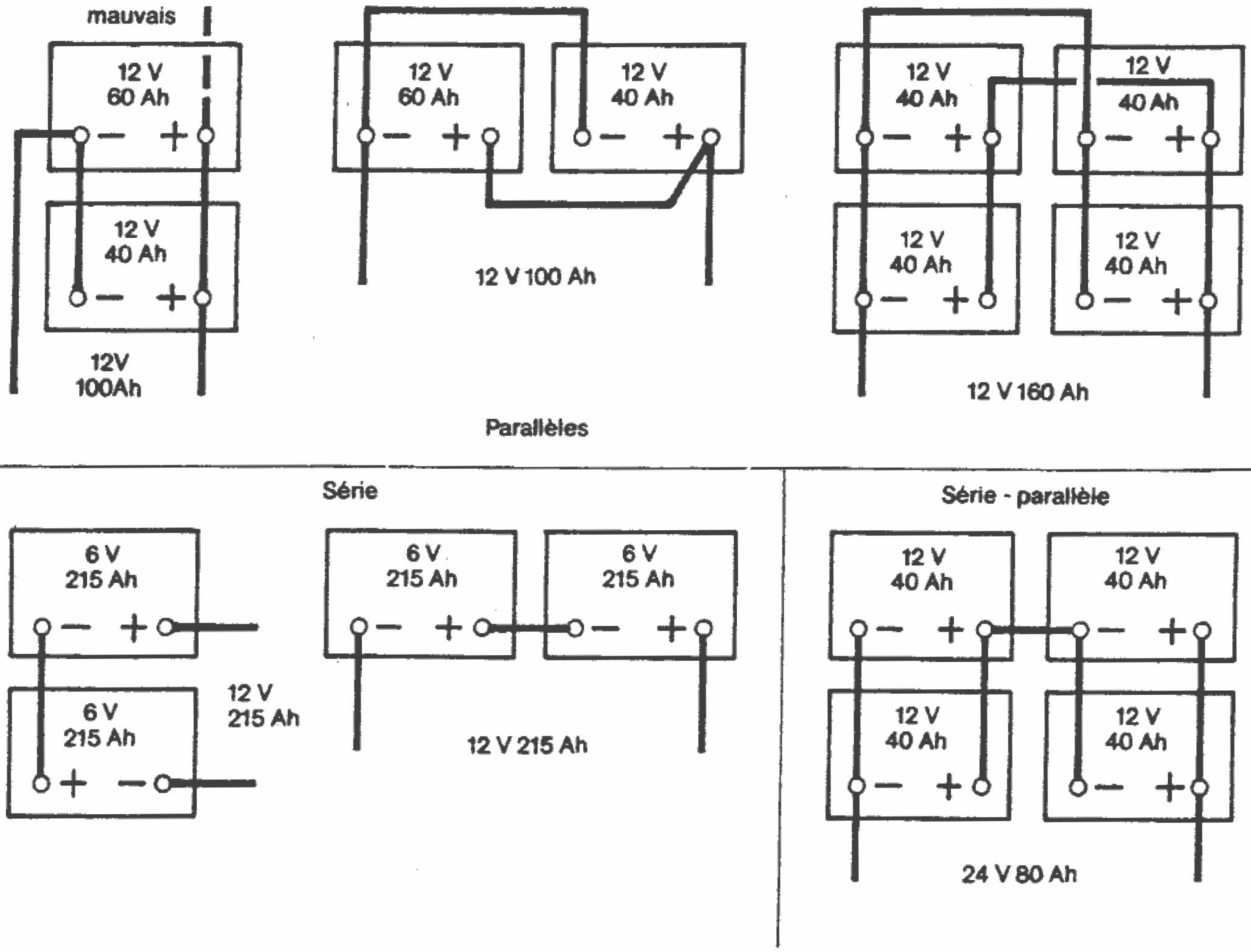


Fig. 8-2 • Différents types de branchements de batteries.

On placera au-dessus une grille en plastique pour que la chute d'un objet métallique ne puisse provoquer un court-circuit.

Sauf sur les petits voiliers où la puissance des moteurs et le bilan électrique sont faibles, il sera toujours préférable de prévoir des batteries et des circuits séparés pour le démarrage et les besoins du bord.

Lorsque, pour obtenir la tension ou la capacité requises, on est amené à relier plusieurs batteries, le branchement de celles-ci se fera en série dans le premier cas, en parallèle dans le second. En série, on ne doit brancher que des batteries de capacité égale et de même modèle, la tension totale sera la somme des tensions unitaires, la capacité restant égale. Ainsi deux éléments de **6** V **215** Ah en série donneront **12** V et **215** Ah. Mais le montage en série devra être évité, dans toute la mesure du possible, car la résistance interne des différents éléments peut évoluer, ce qui entraînerait des pertes.

Dans un montage en parallèle, la tension reste égale mais la capacité est la somme des capacités unitaires qui peuvent être différentes. Deux éléments de **12** V, l'un de **40** Ah et l'autre de **60** Ah donneront **100** Ah sous **12** V.

La FIGURE **8-2** donne quelques exemples de branchements tenant compte de l'équilibrage des batteries les unes par rapport aux autres et du nombre de connexions. Chacun introduisant une résistance, il est essentiel que leur nombre soit le même pour chaque batterie et que les câbles assurant les liaisons en série soient de même section que ceux de branchement.

Le branchement sur les bornes des batteries se fera avec des cosses standards soudées sur du câble multibrin de section $s_{mm^2} \geq c \cdot I_{1sec} \cdot L$, avec :
c : **0,05** en **12** V, **0,025** en 24 V* ;
I_{1sec} : intensité admissible en **1** seconde, $\approx 8 \times C_{20}$;
L : longueur totale des câbles positif et négatif en mètres.

* Ces coefficients sont valables pour une perte de tension de 3 %. Pour d'autres valeurs de perte **c = 0,018/p**, **p** étant la perte admise en volts.

Cette formule sera également applicable aux câbles de liaison avec le démarreur.
Exemple : pour **U = 12** V, C_{20} **= 100** Ah et **L = 2** m,
on aura : I_{1ec} **= 8 x 100 = 800** et
s ≥ 0,05 x 800 x 2 = 80 mm²

À l'autre extrémité des câbles, seront serties et soudées des cosses en cuivre étamées. N'utiliser que des cosses fermées afin d'éviter tout risque d'échappement en cas de desserrage. Ces câbles sont reliés directement à un coupe-batterie bipolaire, ou, plus souvent, deux coupe-batterie unipolaire. Lorsqu'à la sortie de celui-ci plusieurs câbles doivent être connectés, il sera nécessaire de prévoir des « bus »*, c'est-à-dire des barres de cuivre montées sur isolateurs et portant une série de trous taraudés, munis de vis recevant les cosses des différents câbles. Quelques vis supplémentaires seront laissées en attente. Cet ensemble, dont le montage est pratiquement définitif, sera, ainsi que l'extérieur des cosses de batterie, peint avec une peinture polyuréthanne pour éviter la corrosion et placé dans une boîte en plastique pour éviter tout risque de court-circuit.

5 RECHARGE DES BATTERIES

La dynamo, utilisée autrefois pour produire du courant continu, a aujourd'hui pratiquement partout cédé la place à l'alternateur marine équipé d'un redresseur-régulateur statique (à composants électroniques) incorporé et antiparasité qui délivre un courant continu adapté à l'état de charge de la batterie.

L'alternateur fourni avec le moteur sera rarement suffisant pour le bilan électrique total et il sera nécessaire d'équiper le moteur, soit d'un modèle plus puissant, soit de deux alternateurs. Cette dernière solution assure une plus grande fiabilité si des systèmes de couplage ou de répartition de charge sont prévus.

Pour calculer la puissance nécessaire, on définira tout d'abord la durée journalière de fonctionnement du moteur : **4** h par exemple.

Connaissant la capacité de la batterie domestique définie par le bilan électrique, on divisera celle-ci par la moitié de la durée de fonctionnement du moteur. Ainsi, pour notre batterie de **105** Ah, il faudra un alternateur de **105/2 = 52,5** A. Celui fourni par le Nannidiesel 4.180 étant de **55** A sera suffisant. Ce ne serait pas le cas si le voilier était équipé d'un radar, d'un réfrigérateur électrique et autres gros consommateurs d'énergie ou si l'alternateur d'origine était moins puissant.

* Contraction de « barre-omnibus ».

Les catalogues des fabricants fournissent tous les éléments nécessaires au calcul des poulies d'entraînement et au montage des alternateurs sur le moteur.

Lorsque l'on équipe un voilier de plusieurs parcs de batteries, il est indispensable de pouvoir coupler ceux-ci en cas de défaillance de l'un d'eux ou lorsque le système de charge est commun, il est en effet préférable qu'en fonctionnement normal, les différents parcs restent indépendants.

Dans le cas d'un seul chargeur et de deux parcs de batteries, on aura recours à un coupleur qui permettra les combinaisons suivantes (FIGURE **8-3**) :
position 0 ou « off » : circuit d'utilisation coupé ;
position 1 : charge de batterie 1 ;
position 2 : charge de batterie 2 ;
position 1 + 2 ou « both » : batteries en parallèle.

Ce coupleur devra être du type « sans coupure à la manœuvre » afin qu'il n'y ait aucune interruption du circuit d'excitation de l'alternateur, ce qui provoquerait la destruction des diodes du redresseur.

Les câbles reliant l'alternateur au coupleur et aux « bus » des batteries devront avoir une section : **s ≥ c . I_{alt} . L** avec :
c : 0,1 en **12** V, **0,05** en **24** V.
I_{alt} : débit maximum de l'alternateur ;
L : longueur totale des câbles positif et négatif en mètres.
Exemple : **U = 12** V, I_{alt} **= 55** A, **L = 2** m
s ≥ 0,1 x 55 x 2 = 11 mm²

Lorsque l'installation comportera plus d'un alternateur ou plus de deux parcs de batteries, on aura recours à un répartiteur de charge qui assurera automatiquement l'équilibre des charges et décharges entre les sources d'alimentation et les consommateurs, tout en assurant leur protection.

On trouvera chez les fabricants ou importateurs toutes les combinaisons possibles de répartiteurs et de chargeurs à une ou plusieurs entrées et deux ou plusieurs sorties permettant toutes les combinaisons possibles de sources de charge et de parcs de batteries.

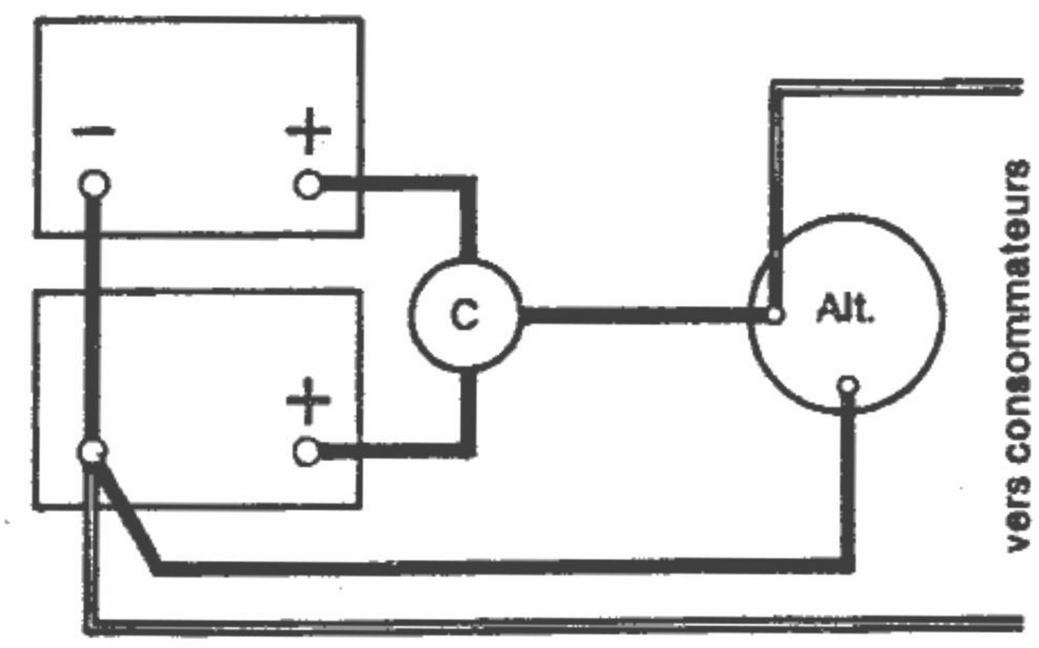


Fig. 8-3 • Schéma du circuit de charge de deux parcs de batteries par un alternateur avec un coupleur.

D'autres sources peuvent être utilisées à bord d'un voilier pour assurer la production d'énergie électrique et la recharge des batteries. Nous les passerons rapidement en revue, renvoyant le lecteur aux références bibliographiques en fin de chapitre pour plus de détails.

a ▪ Alimentation à quai et chargeurs

Avec le développement des marinas où il est possible de se brancher directement sur le secteur 240 V~ se développent des systèmes de recharge mobiles ou fixes, ces derniers constituant pratiquement une alimentation mixte.

Un simple chargeur de batterie d'automobile constituera un matériel mobile suffisant. Il est bon cependant de lui prévoir une installation semi-fixe afin de le protéger de l'eau et des chocs, tout en restant facile à surveiller. Une prise d'ampérage convenable le reliant par des conducteurs fixes aux bornes des batteries sera préférable aux classiques câbles volants avec cosses.

Un chargeur automatique peut permettre non seulement la recharge des batteries, mais aussi l'alimentation directe lorsque cette recharge est terminée. Il est relié aux « bus » par des câbles fixes et à l'extérieur par une prise mâle étanche bipolaire plus terre. La sécurité de la liaison avec le quai est assurée soit par un transformateur d'isolement, soit par un disjoncteur différentiel, soit par les deux. Dans le cas d'un transformateur d'isolement, la mise à la masse est différente selon sa construction. On peut trouver en effet des transformateurs dont l'armature est reliée à la terre du secteur, auquel cas il n'y a pas de liaison avec la masse du bateau. En revanche, il y a des transformateurs dont l'armature est reliée au boîtier, et dans ce cas, l'ensemble est relié à la masse du bateau mais pas à la terre. D'autres, enfin, où le secondaire, et parfois l'armature, sont reliés à la masse du bateau, mais pas à la terre.

Dans tous les cas, la masse du bateau ne doit pas être reliée à la terre.

Avec un disjoncteur, la masse du bateau et la terre sont toujours reliées, sauf si un transformateur d'isolement est monté après le disjoncteur ce qui ramène au cas précédent.

Les mêmes précautions sont à prendre pour les circuits intérieurs en 240 V ~ que l'on trouve sur les grosses unités. De plus, leurs prises doivent être d'un brochage différent de celui du circuit très basse tension, pour qu'il n'y ait aucun risque d'erreur de branchement.

b ▪ Les groupes électrogènes

Faire fonctionner un moteur de **31** kW pour entraîner un alternateur de **0,72** kW n'est bon ni pour le rendement ni pour le moteur lui-même, le diesel n'aimant pas fonctionner sans charge suffisante. Le groupe électrogène indépendant s'impose donc dès que le bilan électrique devient important et surtout que la taille du voilier permet de disposer d'une « salle des machines » pouvant recevoir quelques auxiliaires en plus du moteur. On choisira impérativement un groupe utilisant le même carburant que le moteur de propulsion afin de simplifier l'installation et surtout d'éviter tout risque de mélange indésirable.

Il entraînera bien sûr un alternateur de préférence à une dynamo. Son installation répondra aux mêmes conditions que celles du moteur principal et, l'on veillera particulièrement à la solidité de sa fixation et à son accessibilité. J'ai un souvenir douloureux d'un Meltem où, pour changer les charbons de la dynamo, il fallait déposer tout le groupe plaqué dans un coin de la salle des machines.

Le groupe électrogène fixe doit posséder son propre tableau de contrôle et son régulateur de charge.

Un petit groupe portable est une bonne précaution. En fonctionnement, il sera toujours installé à l'extérieur sur un plan horizontal, car son échappement se fait directement dans l'atmosphère et il ne supporte pas de fortes inclinaisons.

Au repos, il sera arrimé dans un coffre approprié et protégé de l'humidité et des chocs. Ces groupes fournissent soit du courant « secteur » **110** ou **220** V~ **50** ou **60** Hz soit de la très basse tension, généralement **12** V =. Mais, comme ils ne sont pas munis d'un régulateur de charge, ils nécessitent une surveillance attentive des batteries, si on les utilise en charge directe. Le mieux est de leur faire alimenter en **220** V, par la prise de quai, un chargeur automatique qui assurera tous les contrôles nécessaires.

c ▪ Alternateurs de ligne d'arbre, générateurs de traînée, éoliennes et panneaux solaires

Ces équipements qui ont connu une grande vogue et des progrès certains, sous l'impulsion des grandes courses au large où l'utilisation du moteur était prohibée, doivent être considérés, à mon avis, comme des moyens d'entretien des batteries plus que comme de véritables producteurs d'énergie, compte tenu des sujétions qu'ils imposent pour un prix qui reste élevé et un rendement faible.

6 LES CIRCUITS DU MOTEUR

Le moteur de propulsion possède un circuit électrique qui lui est propre, tout en étant relié au reste de l'installation dont il assure l'essentiel de la production d'énergie électrique.

On voit apparaître de plus en plus de moteurs marins équipés d'installations bipolaires sans retour par la masse du moteur. Cette disposition est réglementaire pour les moteurs montés sur des coques métalliques, et dans tous les cas fortement conseillée en raison de la sécurité qu'elle apporte sur le plan de la corrosion. Des kits de transformation sont parfois prévus par les fabricants, et les accessoiristes proposent démarreurs, alternateurs et autres accessoires en version bipolaire.

La documentation du fabricant fournit généralement tous les éléments nécessaires au câblage des circuits du moteur et de son tableau de contrôle. Nous insisterons simplement sur l'importance de la section des câbles du démarreur qui sera calculée selon la même formule que les câbles de batterie, en prenant pour longueur totale celle de la cosse de la batterie à la cosse du démarreur plus le retour.

7 LES CIRCUITS GÉNÉRAUX

L'installation des circuits à bord des voiliers relève souvent malheureusement de la plus large improvisation, tant dans la définition des schémas de câblage que de leur réalisation.

a ▪ Les schémas

En dehors des circuits spécifiques du moteur, du groupe électrogène ou d'autres installations particulières, dont les schémas seront fournis par les fabricants, les circuits du bord seront divisés en deux parties correspondant aux câbles situés en amont du tableau électrique (batteries et leur système de charge) et ceux situés en aval du tableau électrique et incluant celui-ci. Les FIGURES **8-4** et **8-5** en fournissent des exemples.

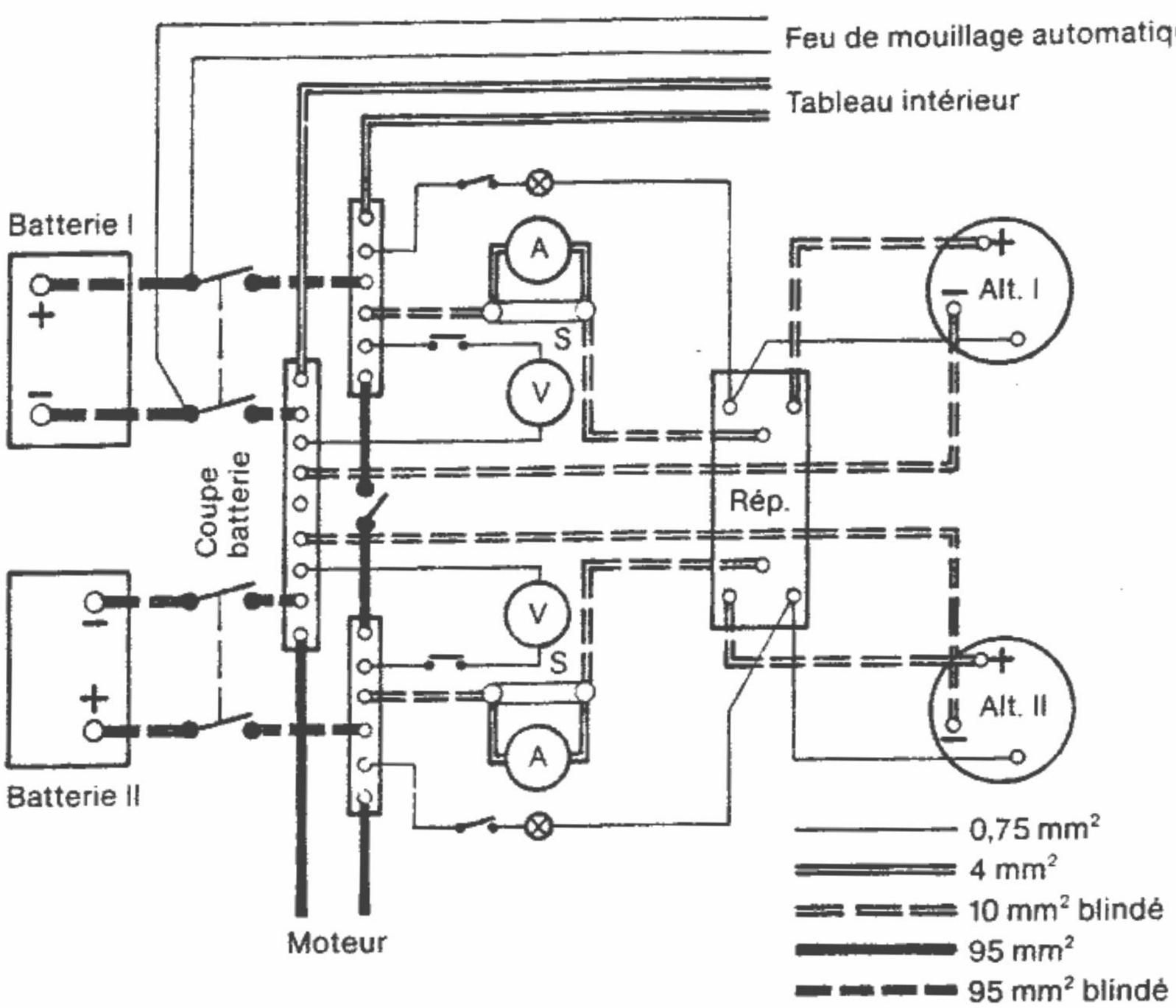


Fig. 8-4 • Schéma du circuit de charge de deux parcs de batteries avec deux alternateurs et un répartiteur. Une liaison entre les deux bus positifs par un interrupteur de même calibre que les coupe-batterie permet de coupler les deux parcs en parallèle si nécessaire. Grâce aux shunts de 100 A, S, les ampèremètres peuvent être montés sur le tableau ainsi que les voltmètres et les voyants et leurs interrupteurs. Le circuit du feu de mouillage automatique est pris en amont des coupe-batterie. Les blindages des câbles sont reliés à la terre.

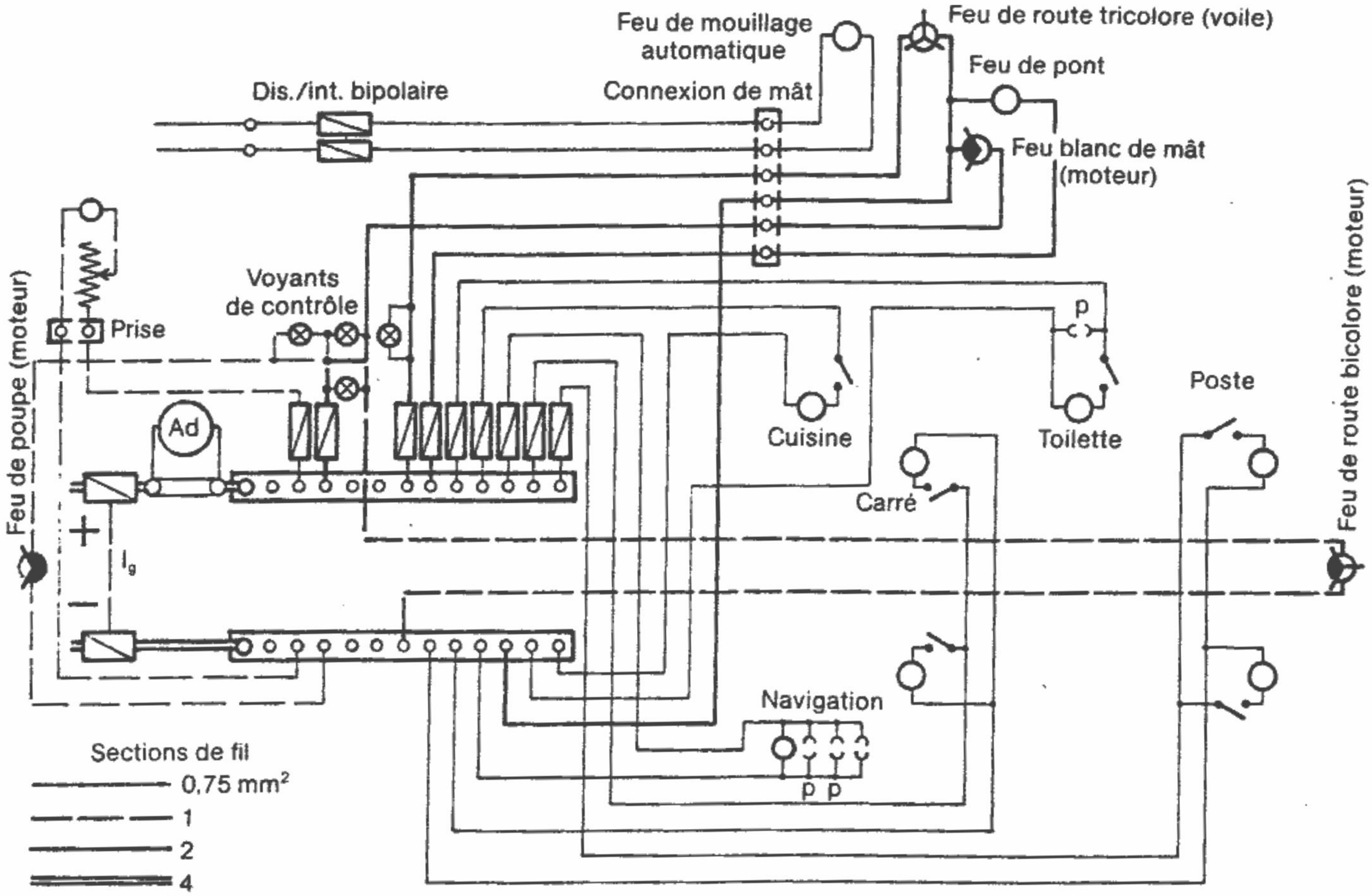


Fig. 8-5 • Schéma des circuits intérieurs d'un voilier de 8 m. On notera le circuit indépendant alimenté directement depuis la batterie pour le feu de mouillage automatique. Chaque circuit est équipé au départ du bus positif d'un disjoncteur/interrupteur. L'intensité de l'éclairage du compas est réglée par un rhéostat/interrupteur; le même peut être monté sur l'éclairage de la table à cartes.
I_g : disjoncteur/interrupteur général bipolaire;
A_d : ampèremètre de contrôle de débit avec shunt;
p : prises de courant.

Ces schémas doivent être clairs, facilement lisibles, le code des couleurs doit être indiqué et repéré ainsi que chaque appareil, les sections des câbles calculées.

Il est toujours préférable que la disposition du schéma corresponde à l'implantation réelle dans la coque afin de faciliter l'installation et le repérage ultérieur des conducteurs.

Deux types de circuits seront généralement utilisés, en ligne ou en dérivation. Dans un circuit en ligne, le consommateur est directement alimenté depuis le tableau par un conducteur bipolaire. Dans un circuit en dérivation, chaque consommateur (ou plusieurs consommateurs en parallèle) est relié par un conducteur bipolaire à une ligne générale. Il n'y a de toute façon jamais de retour par la masse sur un bateau.

Dans un schéma comme celui de la FIGURE 8-5, on rencontre les deux types de circuits. Ainsi par exemple les éclairages ou les prises d'une même section du navire : cabine avant, carré, cuisine, table à cartes... sont montés en dérivation sur une ligne qui leur est propre, alors que le feu tricolore de tête du mât, l'éclairage du compas auront chacun leur ligne spécifique.

On trouve aussi des solutions mixtes, le retour des autres feux de mât pouvant être commun avec celui du feu tricolore afin de réduire le nombre de ces conducteurs toujours exposés. À noter le cas particulier du feu de mouillage à allumage automatique dont l'alimentation est assurée directement depuis la batterie afin de pouvoir isoler tout le reste de l'installation lorsque le voilier est laissé seul au mouillage.

Dans tous les cas, il est impératif d'éviter les boucles fermées qui empêcheraient la réception radioélectrique, en particulier la radiogoniométrie. Pour la même raison, les fils d'alimentation de l'éclairage du compas doivent être torsadés pour que le courant n'influe pas sur le compas.

Chaque ligne sera équipée à son départ (+) d'un fusible et d'un interrupteur ou d'un disjoncteur type *Diruptor*. De plus, des fusibles et un interrupteur bipolaire ou un disjoncteur bipolaire seront placés à l'entrée du tableau.

Leur calibre correspondra à 125 % de l'ampérage total des consommateurs branchés sur chaque ligne pour les premiers et de l'ampérage total de l'installation pour le second.

b ▪ Les câbles

À plusieurs reprises, nous avons insisté sur l'importance de la section des conducteurs, ce point est encore plus sensible dans l'installation domestique où les longueurs sont parfois importantes et où une chute de tension trop élevée peut entraîner une baisse d'éclairement désagréable ou préjudiciable à la sécurité, comme pour les feux de navigation par exemple.

Pour ces circuits, la section $\mathbf{s \geq c \cdot I \cdot L}$ avec

c : **0,05** en **12** V, **0,025** en **24** V ;

I : intensité absorbée par l'appareil ;

L : longueur totale positif plus négatif en mètres.

Dans le cas d'un circuit comportant une ligne et des dérivations, la longueur à considérer sera celle de la ligne, plus la longueur totale des dérivations divisée par leur nombre. L'intensité sera le total des intensités des appareils placés sur les dérivations.

Par exemple : une ligne de **3** m alimente en **12** V trois dérivations de **1** m, **2** m et **1,50** m alimentant un éclairage de **10** W et deux de **6** W.

L'intensité maxi sera $(10 + 6 + 6)/12 = 1{,}83$ A et la longueur à considérer $L = 2\,[3 + (1 + 2 + 1{,}5)/3] = 9$ m. La section du câble sera d'au moins $0{,}05 \times 1{,}83 \times 9 = 0{,}83$ mm², on prendra donc pour la ligne du câble de 1 mm².

Pour la dérivation la plus longue qui alimente l'éclairage de **10** W, on aura $s \geq 0{,}05 \times (10/12) \times (2 \times 2) = 0{,}17$ mm², on pourrait prendre du câble de **0,5** mm². La chute de tension admissible donnée par le coefficient **c** utilisé dans les formules de ce livre est inférieure à celle prévue par la norme afin de tenir compte des pertes qui ne manqueront pas de se produire dans le temps, notamment au niveau des contacts.

La section des câbles doit bien sûr être compatible avec la puissance de l'appareil à alimenter, la température du local et le nombre de conducteurs placés côte à côte. L'annexe A.1 de la norme ISO 10133 fournit les renseignements nécessaires.

Les sections nominales sont : **0,75 - 1 - 1,5 - 2,5 - 4 - 6 - 10 - 16 - 25 - 35 - 50 - 70 - 95 - 120 - 150 - 185 - 240 - 300 - 400** et **500**.

La norme ISO 10133 préconise l'utilisation de câbles toronnés afin d'éviter les risques de ruptures dus aux vibrations ou aux déformations de la coque. Personnellement, je leur reproche d'être plus sensibles à la corrosion que le câble rigide car ils absorbent l'humidité par capillarité et, sauf pour les conducteurs de plus de **2,5** mm² et ceux situés à proximité du moteur qui seront souples, on évitera des risques de rupture des conducteurs rigides en roulant une dizaine de spires de **15** mm de diamètre environ à chaque connexion.

Le gainage des câbles n'est pas à considérer ici dans sa fonction d'isolant, les tensions sont trop faibles, mais de protection et de résistance à l'environnement. Pour les câbles utilisés dans le compartiment moteur, on prendra des conducteurs avec gaine en polychloroprène ou matériau équivalent, résistant à au moins 75° C, référence H 05 RN-F ou en caoutchouc de silicone référence H 05 SJ - K s'ils sont exposés à la chaleur (Norme NF C 32-102). Pour les autres câbles, on utilisera des câbles isolés au PVC. Les références sont les suivantes (Normes NF C 32-201) :

conducteur rigide : H 07 V-U ou R ;

conducteur souple : H 07 V-K ;

câble rigide : A 05 VV-U ou R ;

câble souple : A 05 VV-F.

Les câbles seront placés dans des gaines en matière plastique grise (non propagatrice de la flamme type NF USE - IR 05 (rigide) ou IC 05 (flexible) soutenues tous les **450** mm minimum, ou dans les moulures en bois.

Leur emplacement sera choisi de telle façon qu'elles soient protégées de l'humidité, des écrasements et des percements en cas de pose d'accastillage ultérieure. En aucun cas, un câble quelconque ne devra passer en dessous du plan des couchettes. Le trajet dans les fonds des câbles des loch-speedomètres et sondeurs, des pompes immergées ou des jauges sera aussi court que possible avant d'atteindre la cloison la plus proche sur laquelle ils remonteront. Un trou sera percé au point le plus bas des gaines pour permettre l'évacuation de l'eau de condensation. Les trous de passage des câbles seront garnis d'un passe-fil en caoutchouc.

On laissera dans les gaines un messager en ligne de nylon pour pouvoir repasser un câble ultérieurement.

Les épissures et les dominos seront prohibés et toutes les connexions ou dérivations se feront sur des barrettes à bornes dans des boîtiers en matière plastique assurant une protection IP 44 selon norme CEI 529. Dans toute la mesure du possible, on évitera les connexions par serrage direct des fils au bénéfice de cosses fermées serties aux extrémités des

conducteurs et sur l'isolant; une rondelle éventail sera placée entre la tête de vis et la cosse pour éviter tout desserrage.

c ▪ Le tableau électrique

Les principales fonctions d'un tableau électrique sont d'une part d'assurer la répartition du courant fourni par les batteries vers les différents utilisateurs et, d'autre part, de fournir les informations nécessaires au contrôle de la charge des batteries. Le panneau avant du tableau portant les différents appareils de commande et de contrôle doit satisfaire aux exigences d'étanchéité de la norme CEI 529. Les tableaux contrôlant les circuits continu et alternatif devront être séparés ou cloisonnés.

L'arrivée de la batterie se fera sur deux bus largement dimensionnés. Les retours des différents circuits peuvent ainsi se brancher directement sur le bus négatif, les départs se faisant sur une barrette à bornes reliée au bus positif à travers les fusibles et interrupteurs du tableau.

L'accès aux connexions et à la façade portant les accessoires doit être aussi aisé que possible, la meilleure disposition consistant à monter cette façade sur charnières, les bus et barrettes à bornes étant fixés dans le fond du coffret. Chaque connexion et chaque conducteur doivent être identifiés par une étiquette portant un numéro renvoyant à une nomenclature ou désignés en clair.

L'ABYC (*American Boat & Yacht Council*) a adopté le code du TABLEAU **8-II** auquel on pourra se référer mais qui concerne essentiellement les circuits du moteur.

Le faisceau de fils reliant les accessoires en façade aux bus et aux barrettes à bornes doit être soigneusement aligné et ligaturé et sa longueur doit permettre d'ouvrir la façade sans forcer. Il en sera de même pour chaque faisceau de fils partant vers un même conduit.

La tendance actuelle va vers le remplacement de l'ensemble fusible-interrupteur par des disjoncteurs type *Diruptor*. Ceux-ci doivent être adaptés à la puissance de chaque circuit.

Les instruments de mesure seront au nombre de deux : les ampèremètres et les voltmètres.

L'ampèremètre de contrôle de charge sera de préférence à 0 milieu, ce qui permettra de contrôler le fonctionnement du régulateur. On choisira un ampèremètre à shunt extérieur qui permettra de le monter à distance sur le tableau.

Le voltmètre classique **0-15** V sera avantageusement remplacé par un indicateur de charge qui n'indiquera que la plage utile de **10** à **15** V ou **20** à **30** V dans laquelle oscille la tension de la batterie. Le voltmètre étant monté en dérivation sur les bus, il sera facile de l'équiper d'un bouton poussoir pour qu'il ne reste pas sous tension en continu.

Le tableau devra comporter autant de couples ampèremètre-voltmètre qu'il y a de parcs de batteries. Ces instruments devront alors être raccordés entre le coupleur ou le répartiteur de charge et les coupe-batterie.

Il sera utile, pour détecter une fuite de courant éventuelle, de disposer au tableau d'un milliampèremètre de débit **0-50** mA sur shunt.

Il est également intéressant de pouvoir contrôler le fonctionnement de certains circuits comme celui des feux de navigation par un voyant. On choisira un modèle à L.E.D. monté en parallèle sur la sortie + de l'interrupteur. Ainsi, si l'ampoule est grillée, le voyant ne pourra s'allumer.

8 LE MATÉRIEL

On ne choisira pour l'équipement électrique que du matériel spécialement destiné à un usage maritime sans retour par la masse et réalisé en matériaux résistant à la corrosion. On veillera également à ce que des équipements comme les feux de navigation correspondent bien à la réglementation sur la sécurité et soient montés correctement.

On se méfiera des prises de courant théoriquement étanches, les vraies sont rares et très chères et, sauf pour l'alimentation à quai, on remplacera les prises (de feux de mât par exemple) par des barrettes à bornes placées à l'intérieur de la coque, l'étanchéité du passage du câble étant assurée par un passe-fil étanche à presse-étoupe.

9 FOUDRE, CORROSION ET MASSE

Si les cas de foudroiement d'un voilier sont extrêmement rares sur nos côtes, le voilier de grande croisière sera amené à fréquenter des régions où il n'en est pas de même.

C'est pourquoi ce problème doit être considéré avec attention. Les Américains, plus concernés que nous, ont établi, par leur organisation professionnelle ABYC, des recommandations dont nous donnerons ici l'essentiel et qui rejoignent celles qui sont nécessaires à la protection contre la corrosion, bien que, de leur avis même, elles ne résolvent pas tous les cas. Nous avons vu en effet au CHAPITRE **5-B-4** PAGE **36** qu'une des bonnes précautions pour égaliser les potentiels des différentes pièces en contact avec l'eau : vannes, jaumière, étambot... consistait à relier tous ces accessoires entre eux et à une anode de protection. C'est le même circuit que l'on utilisera pour la protection contre la foudre et toutes les mises à la terre, que ce soit celles des réservoirs de carburant et du moteur, du fil de terre de la prise de quai, des appareils électriques et de radio ou des boîtiers métalliques des appa-

TABLEAU 8/II
CODAGE COULEUR DES CIRCUITS

Couleur	Appareil	Utilisation
Jaune à bande rouge (JR)	Circuit du démarreur	Du contact au relais
Jaune (J)	Dynamo ou alternateur	Du stator au régulateur
Jaune (J)	Ventilateur de compartiment moteur	De l'interrupteur ou du fusible au ventilateur
Vert (V)		Circuit de masse*
Gris foncé (GF)	Feux de navigation	De l'interrupteur ou du fusible aux feux
Gris foncé (GF)	Compte-tours	Du compte-tours à la prise
Noir (N)		Retour ou connexion négatifs
Marron (M)	Armature dynamo	De l'armature dynamo au régulateur
Marron (M)	Voyant de charge alternateur	De la borne de la dynamo ou de la borne auxiliaire de l'alternateur au voyant et au régulateur
Marron (M)	Pompes	De l'interrupteur ou du fusible au + de la pompe
Rouge (R)		Conducteur principal positif principalement sans fusible
Orange (O)	Circuits accessoires	Ampèremètre vers sortie alternateur ou dynamo et fusibles ou interrupteurs d'accessoires
Orange (O)	Communs accessoires	Du tableau aux interrupteurs
Violet (Vi)	Allumage	Du contact à la bobine et aux interrupteurs
Violet (Vi)	Circuits instruments	Du tableau aux instruments
Bleu foncé (Blf)	Cabine et éclairage des instruments	Des interrupteurs ou fusibles aux lampes
Bleu clair (Blc)	Pression d'huile	De la prise de pression au cadran
Brun (Br)	Température d'eau	De la prise de température au cadran
Rose (Ro)	Jauge de carburant	De la jauge au cadran

* On peut également, pour ces circuits, utiliser un bicolore vert-jaune (VJ) pour correspondre à la réglementation E.D.F.

reils électriques. Pour la protection contre la foudre, ces liaisons incluront également les cadènes, pied de mât, chandeliers et toutes autres pièces d'accastillage importantes, situées au-dessus du pont telles que daviers, balcons, etc.

La continuité électrique devra bien sûr être assurée avec le gréement et le mât. Néanmoins, lorsqu'un radiogoniomètre est utilisé à bord, la « cage » ainsi constituée peut provoquer des déviations importantes, voire rendre l'appareil inutilisable. Dans ce cas, seul le mât sera relié à la masse par une liaison sûre, alors qu'au contraire le gréement sera isolé des cadènes de coque. Toute pièce métallique de masse importante située à moins de **1,80** m des conducteurs de masse devra y être reliée de façon à éviter toute amorce d'étincelle.

Les antennes de radio devront être munies d'un inverseur permettant de les relier à la terre en cas d'orage ou être équipées d'un parafoudre.

Afin d'éviter que la terre de la ligne de quai ne puisse servir de conducteur à des courants galvaniques entraînant des corrosions indésirables, sa liaison avec le circuit de masse pourra comporter des diodes bloquant les courants de faible intensité.

Les conducteurs de masse en cuivre ne doivent pas avoir une section inférieure à **8** mm² (N° 8 A.W.G. en jauge américaine) ou **0,8** x **12** mm s'il s'agit de feuillard. Ils seront protégés contre la corrosion et ne seront pas en contact avec la coque ni avec aucun matériau risquant de s'enflammer par suite de l'échauffement du conducteur.

Tous les raccords et connexions doivent être assurés par des moyens mécaniques et, si les conducteurs ne sont pas isolés, l'ensemble sera peint après la pose.

Ce circuit de masse, **qui en aucun cas ne peut être utilisé comme retour d'un circuit électrique**, est relié à une plaque

de masse en cuivre, extérieure à la coque, d'au moins **0,1** m². Les plaques de masse en métal fritté utilisées pour la radio sont bien sûr utilisables si elles sont de surface équivalente.

Dans le cas où les circuits des auxiliaires du moteur sont unipolaires avec négatif à la masse, le circuit de celle-ci sera relié au négatif de la batterie de démarrage. Mais cette solution est à éviter autant que faire se peut.

Pour éviter tout risque de corrosion, le circuit de masse doit bien sûr être relié à des anodes dont il faudra surveiller soigneusement la dissolution.

a ▪ Coques métalliques

La mise en place de circuits de masse sur les coques métalliques est beaucoup plus controversée et les spécialistes sont loin d'être tous d'accord sur les solutions à adopter. Deux écoles se dégagent.

La première considère que la coque peut servir de circuit de masse et qu'un circuit distinct n'est pas nécessaire, à condition que la liaison électrique soit assurée par le contact des accessoires avec la coque. Les autres masses métalliques ou électriques sont reliées directement à la coque par des tresses en cuivre. Si ce système reconnu par l'ABYC est à la rigueur acceptable sur des coques en acier, il est à mon avis beaucoup trop dangereux sur des coques en alliage léger et, dans tous les cas, il est bien difficile d'être sûr que tous les accessoires ont bien un contact électrique correct avec la coque.

On adoptera donc un système analogue à celui décrit pour les coques non métalliques en isolant la plaque de masse du bordé, mais en conservant la liaison du circuit de masse avec les anodes, elles-mêmes reliées au bordé. Ceci peut paraître contradictoire puisqu'on réalise à la fois une liaison générale avec celui-ci et un isolement au niveau de la plaque de masse, mais c'est le seul moyen de contrôler exactement les liaisons nécessaires et d'éviter des corrosions dues à d'autres causes qu'à des fuites de courant.

Ces anodes seront placées aussi près que possible des pièces en métal plus noble que celui de la coque. Ceci ne retire cependant rien au fait que les passe-coque et vannes seront dans toute la mesure du possible en matériau non corrodable (polyamide armé) ou, sinon, seront isolés du bordé et du circuit d'eau par des bagues et des raccords en plastique.

10 ANTIPARASITAGE ET INTERFÉRENCES

Ce n'est qu'assez récemment, face au développement des liaisons radio téléphoniques, d'une part, et des alternateurs d'autre part, que les fabricants de matériel électrique se sont penchés sérieusement sur le problème de l'antiparasitage.

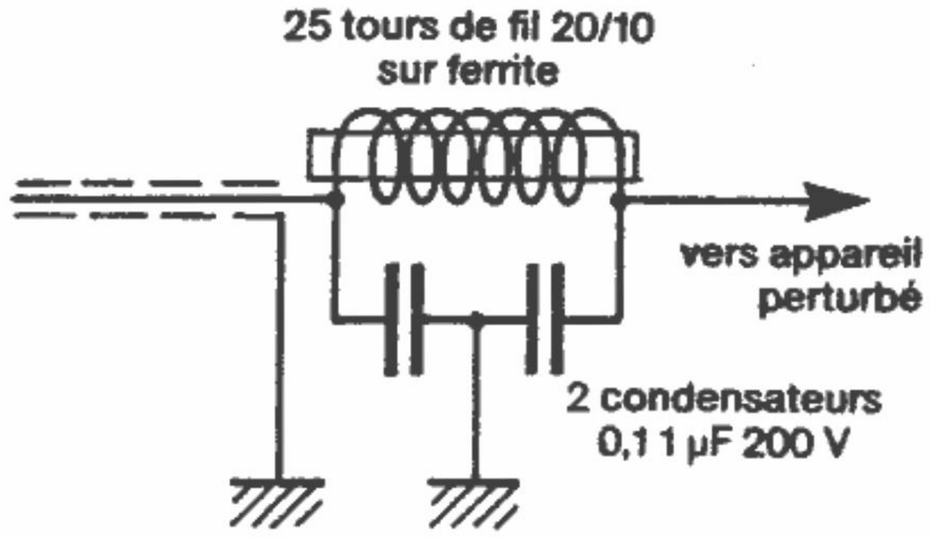


Fig. 8-6 • Protection de l'alimentation des appareils des parasites haute fréquence.

Les sources de ces fréquences radioélectriques ou de ces impulsions parasites sont nombreuses et relativement faciles à identifier. Les parasites de fréquence radioélectrique, voire ultrasonique, et les harmoniques qui y sont jointes ont généralement pour origine les alternateurs, les tubes fluorescents, les émetteurs de radio. Pour les premiers, il existe des boîtiers de filtrage incorporés ou adaptables aux régulateurs-redresseurs. Ceci n'empêchera pas de blinder tous les câbles reliés à l'alternateur, y compris ceux des batteries, ces blindages étant connectés au boîtier et au circuit de masse du bateau.

Pour les seconds, on interposera sur les fils d'alimentation un filtre constitué d'une self et de deux condensateurs dont le point commun est relié à la masse (FIGURE **8-6**). Ces fils seront, de plus, blindés et ce blindage ainsi que les coffrets des appareils seront reliés à la même masse.

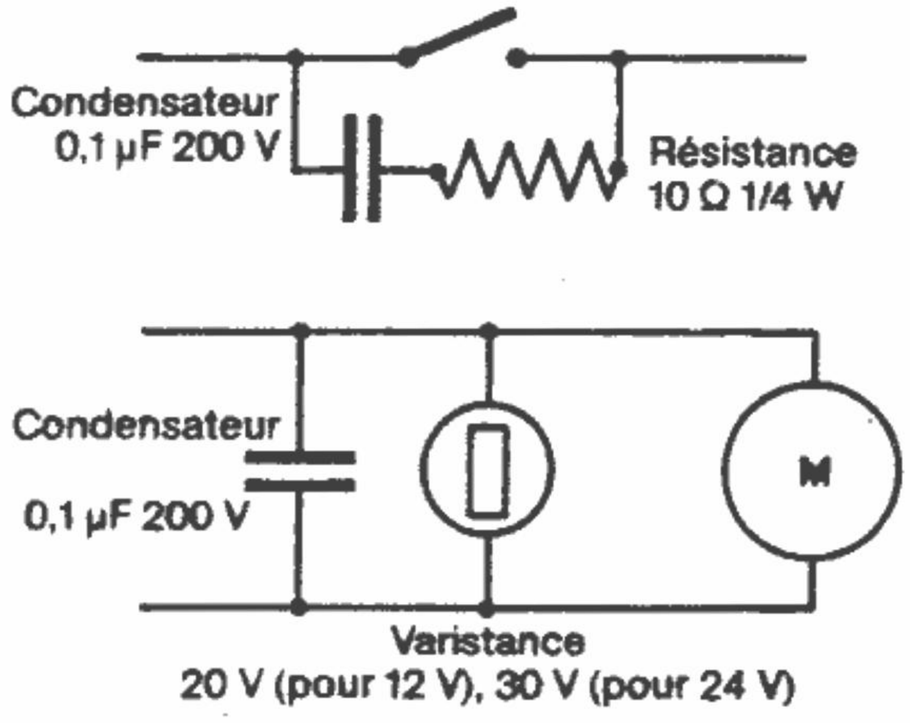


Fig. 8-7 • Élimination des parasites impulsionnels à la source :
- sur un interrupteur (en haut) ;
- sur un moteur (en bas).

On blindera de même les conducteurs reliant les anémomètres, les speedomètres et autres compte-tours à leurs boîtiers, s'ils ne le sont pas d'origine, en tout cas, on n'oubliera pas de les relier à la masse.

Les parasites impulsionnels proviennent de coupures de courant intermittentes (contacteurs) ou continues (moteurs, arbre d'hélice...). La protection la plus sûre se fera au niveau de l'émetteur lui-même.

Sur un interrupteur, on placera entre les deux bornes un condensateur de **0,1** µF et une résistance **1/4** de watt de **10** Ω. Tandis que, sur un moteur, on disposera entre les deux bornes de l'alimentation une varistance ou résistance **VDR**, de **20** V (pour **12** V) ou **30** V (pour **24** V) et un condensateur de **0,1** µF (FIGURE 8-7).

Les parasites impulsionnels dus à des contacts intermittents, tels que haubans sur cadènes ou arbres d'hélice, seront éliminés, soit en isolant entre eux ces éléments, soit au contraire en les reliant par un conducteur fixe.

Un frotteur en carbone ou une brosse métallique appuyant sur l'arbre d'hélice seront reliés à la masse.

On ne s'étendra pas sur la protection contre les parasites provoqués par le circuit d'allumage des moteurs à essence, très rares sur des voiliers neufs, et pour lesquels il existe des équipements spécifiques pour le cas où ils ne seraient pas prévus d'origine.

Dernière précaution, les liaisons des postes de radio avec leur antenne et leur masse doivent être aussi courtes et directes que possible.

B ■ LE GAZ

Les polémiques entretenues sur les différents types de combustibles utilisables pour la cuisson ont aujourd'hui pratiquement cessé, le gaz, qu'il provienne du pétrole liquéfié (GLP), butane ou propane, ou qu'il soit naturel et comprimé (CNG) a complètement supplanté ses concurrents : alcool ou pétrole, non seulement en Europe, mais également en Amérique du Nord, où il progresse très rapidement. Seule l'électricité reste la solution de choix pour les très grosses unités disposant de sources de production d'énergie adaptées.

En Europe, et dans la plus grande partie du monde, le gaz de pétrole liquéfié, propane, mais plus souvent butane, vient largement en tête, le gaz naturel comprimé qui offre une meilleure sécurité, car il est plus léger que l'air, se développe surtout dans les régions productrices.

Les installations ayant peu de différences, nous nous en tiendrons au cas le plus courant : celui du gaz de pétrole pour lequel la réglementation est, de plus, assez précise.

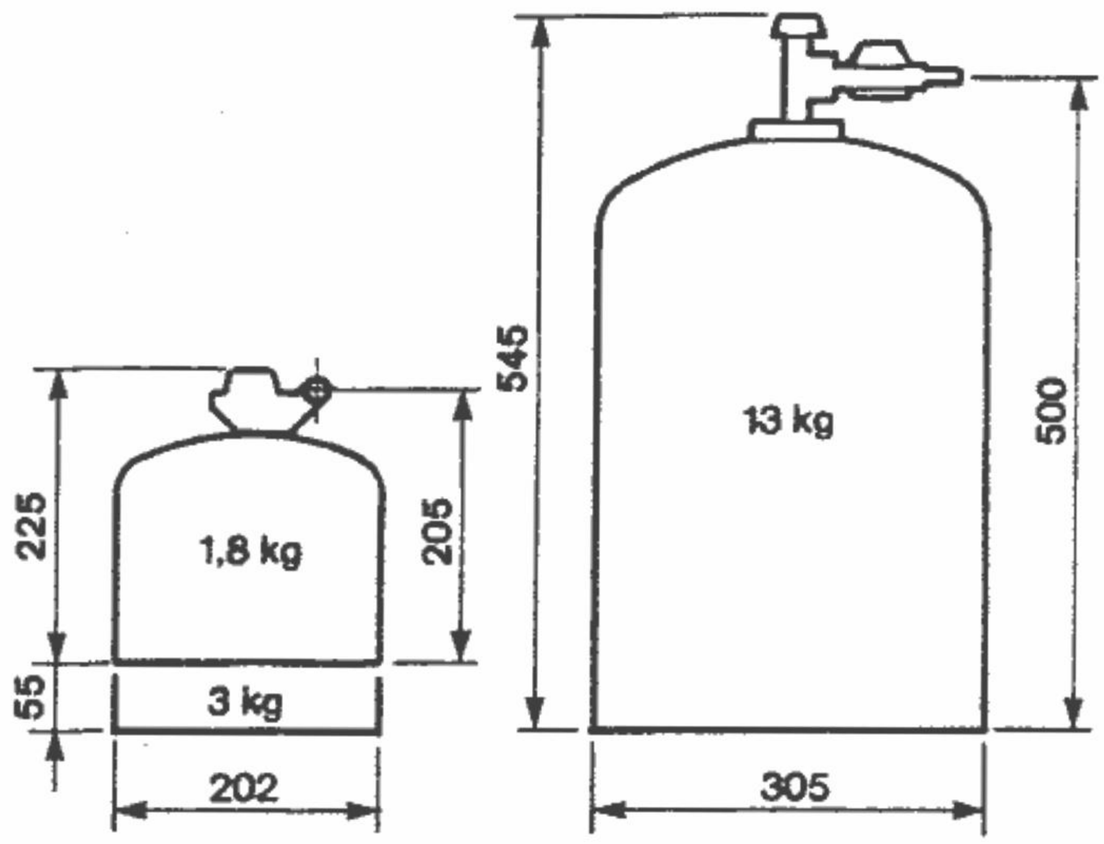


Fig. 8-8 • Dimensions des bouteilles de gaz butane.

Elle est contenue dans la norme ISO 10239. Les recommandations données dans ce paragraphe sont supérieures à ces prescriptions.

En dehors des installations intégrées dans lesquelles la bouteille de gaz est fixée directement, sur l'appareil, une installation se divise en trois éléments : les bouteilles, les canalisations, les appareils.

1 LES BOUTEILLES

Trois types sont utilisés, les petites bouteilles de **1,8** et **3** kg style Camping Gaz et la bouteille de **13** kg. Dans certains pays, on trouve également des bouteilles de **4,5** kg (FIGURE 8-8).

Leur stockage à bord doit s'effectuer dans un compartiment spécifique, isolé des emménagements, et muni d'ouvertures d'aération en parties haute et basse débouchant à l'extérieur, afin d'assurer l'évacuation du gaz en cas de fuite. Ces ouvertures auront une surface d'au moins **50** cm² chacune, et celle située en partie haute devra se trouver au plus à **10** cm en dessous du robinet d'arrêt.

Le simple petit tube en fond de coffre me semble très insuffisant et dangereux. Par ailleurs, il ne suffit pas de dire que les bouteilles doivent être au-dessus de la flottaison, mais qu'elles doivent le rester à au moins **30°** de gîte. Ces bouteilles ne sont absolument pas protégées contre la corrosion marine et j'ai connu un fifty sur lequel elles avaient les pieds dans l'eau dès la moindre gîte.

Les bouteilles devront être solidement fixées pour éviter tout mouvement ou désarrimage.

Il est bon de ne pas les faire reposer directement sur le fond du coffre, mais sur des cales de quelques centimètres

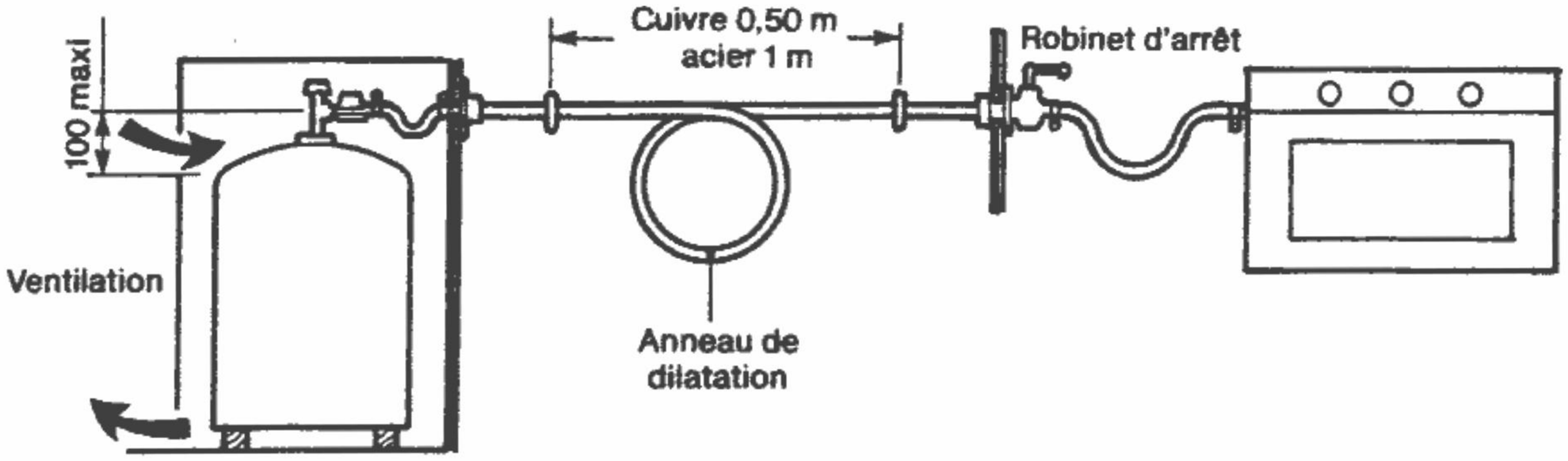


Fig. 8-9 • Installation du circuit de gaz.

pour qu'elles ne baignent pas en permanence dans l'eau pouvant pénétrer par les ouvertures d'aération. La bouteille en service de moins de **13** kg est équipée d'un détendeur-déclencheur de sécurité à robinet incorporé, ramenant la pression dans le circuit basse pression à moins de **50** mbar.

Ce type de détendeur coupe automatiquement l'arrivée de gaz, en cas de fuite.

Ce dispositif n'existe pas, à ma connaissance, pour les bouteilles de **13** kg qui utilisent un détendeur indépendant de la vanne et fournissent une pression de **28** mbar pour le butane et de **37** mbar pour le propane.

2 LES CANALISATIONS

Les canalisations fixes doivent être métalliques, acier inoxydable, cuivre ou matériau équivalent.

Elles sont fixées tous les **0,50** m pour le cuivre, **1** m pour l'acier et protégées des chocs et des frottements (passage de cloison par exemple).

Si des jonctions mécaniques sont indispensables, elles doivent être d'un type convenant au gaz liquéfié et rester accessibles pour leur surveillance. L'utilisation de brasures tendres (température de fusion inférieure à **450**°C) est interdite.

Afin que les déformations de la coque ne puissent entraîner des contraintes excessives dans les canalisations, on interposera une bande de néoprène entre les colliers et le tuyau et, au-delà de **2** m environ de longueur, on formera une boucle au milieu de la canalisation ou on intercalera un soufflet métallique brasé (FIGURE **8-9**).

L'espace minimal entre les tuyauteries et accessoires et les canalisations électriques protégées sera de **3** cm en parallèle et de **1** cm en croisement.

Un robinet d'arrêt est placé à la sortie de la tuyauterie rigide en amont de son raccord avec l'appareil ou son tuyau souple. Il doit être disposé de telle façon qu'il puisse être atteint sans passer le bras au-dessus de l'appareil. Pour le réchaud, par exemple, le mieux sera de le placer sur l'avant et à côté de celui-ci.

Après pose, l'installation, du raccordement du détendeur aux robinets des brûleurs, doit subir une épreuve d'étanchéité effectuée à l'air ou, de préférence, à l'aide d'un gaz inerte (azote). La pression d'essai est le double de la pression de service avec un minimum de **150** mbar. Une fois la pression stabilisée, on ne doit constater aucune fuite dans les 5 minutes suivant une période d'équilibre de 5 minutes, vérification faite à l'aide d'une solution moussante.

Les tuyaux souples sont uniquement destinés au raccordement du détendeur et des appareils sur la tuyauterie rigide. Leur longueur ne dépassera pas **1** m, ils seront conformes à la norme ISO 2928 et leur fixation sera assurée par des colliers de serrage.

Les sections souples doivent rester visibles et accessibles sur toute leur longueur, et être disposées de manière à ne pouvoir être atteintes par les flammes, ni détériorées par les gaz de combustion, les parties chaudes des appareils ou les débordements de produits chauds, ni être endommagées par les frottements ou le ragage.

3 LES APPAREILS

Les appareils à flamme nue (réfrigérateurs, chauffages, chauffe-eau) doivent être munis d'un dispositif coupant automatiquement l'arrivée du gaz lorsque la veilleuse s'éteint. La flamme doit être protégée et l'évacuation des gaz brûlés doit se faire vers l'extérieur par un conduit réalisé en un matériau de la catégorie de réaction au feu MO.

Ces appareils doivent être solidement fixés, tandis que les appareils articulés (réchauds) ne doivent pouvoir se désarrimer quel que soit l'angle de gîte. L'installation doit être conforme à la norme ISO 9094-1.

La ventilation des habitacles renfermant des appareils à flamme nue sans évacuation propre doit être assurée par des ouvertures d'une surface minimale $\mathbf{V}_{mm^2} > (\mathbf{2\ 200\ U}) + (\mathbf{650\ P}) > \mathbf{4\ 000}\ _{mm^2}$. **U** étant la puissance nominale des appareils en kW et **P** le nombre de personnes pour lequel l'habitacle est prévu. Ne sont pas compris dans cette surface les portes de descentes, capots et hublots ouvrants. Ceci rejoint les préoccupations dont j'ai fait état au CHAPITRE 7 - G - PAGE 142.

C ■ L'EAU

À bord des voiliers, deux types de circuits d'eau se concurrencent : l'eau de mer et l'eau douce.

1 LES CIRCUITS D'EAU DE MER

Nous avons déjà étudié deux de ceux-ci à propos de la vidange des cockpits et du refroidissement du moteur. Chaque prise ou évacuation d'eau de mer doit comporter un passe-coque muni d'une vanne. Le bronze, matériau classique de ces accessoires, sera souvent remplacé par un polyamide armé, non sujet à la corrosion. Mais, attention, ce matériau étant plus sensible aux chocs, ils devront être placés de telle façon qu'ils en soient protégés. Néanmoins, les vannes en polyamide seront de règle sur les coques métalliques où le passe-coque sera avantageusement remplacé par un tube soudé à la coque et fileté pour recevoir la vanne. Vannes et passe-coque seront conformes à la norme.

Sur les coques en bois ou en stratifié, la fixation des passe-coque se fera sur une zone renforcée, et on préférera les modèles à collerette avec contreplaque et vis de fixation aux modèles filetés avec écrou qui nécessitent un parfait parallélisme des portées et dont le serrage est plus difficilement contrôlable.

Les vannes seront toutes du type quart de tour à boisseau, de préférence sphérique. Les vannes en bronze sont parfois équipées sur le côté du corps d'un bouchon de purge, on remplacera celui-ci par un bouchon graisseur à chapeau tournant dit « graisseur *Stauffer* » qui permettra d'assurer facilement un bon fonctionnement.

Les vannes à opercule sont à proscrire parce que trop lentes à manœuvrer et difficiles à entretenir.

La position des passe-coque n'est pas quelconque. Dans le cas d'un w.-c., par exemple, celui de la prise d'eau sera placé aussi bas que l'accès à la commande le permettra, afin d'éviter au maximum des risques de désamorçage à la gîte. Pour des raisons évidentes, celui d'évacuation sera placé en arrière de la précédente et juste en dessous de la flottaison.

La crépine est, à mon avis, plus nuisible qu'utile car elle retient trop facilement la végétation qui peut s'y développer et obstruer assez rapidement l'entrée d'eau. Un simple croisillon empêchera les débris trop gros et les sacs en plastique de pénétrer.

Il n'est plus question, à l'heure actuelle, d'utiliser des tuyauteries en plomb, comme on le faisait autrefois. Les matières plastique nous offrent maintenant des produits plus légers et d'un montage beaucoup plus simple. On utilisera donc du tuyau PVC souple transparent. Côté prise d'eau, où le diamètre est plus faible et où des dépressions assez fortes peuvent être provoquées par l'aspiration de la pompe, le tuyau devra être armé d'une tresse textile ou métallique, ou renforcé d'une spirale en PVC noyée dans la paroi (pour conserver un intérieur lisse). Ce tuyau d'alimentation, dans lequel l'eau stagnera en permanence, sera le plus court et le plus direct possible ; mais, il faut éviter absolument les coudes brusques sur lesquels le tuyau ne manquerait pas de s'écraser au bout de quelque temps. Au besoin, prévoir un raccord coudé pour modifier l'angle des embouts.

Côté évacuation, par contre, le tuyau est normalement vide au-dessus du niveau de la flottaison. C'est pourquoi, afin d'éviter les risques de remontée par la cuvette, qui se trouve souvent en dessous de la flottaison, on prévoit un col de cygne montant jusqu'au pont (FIGURE 8-10).

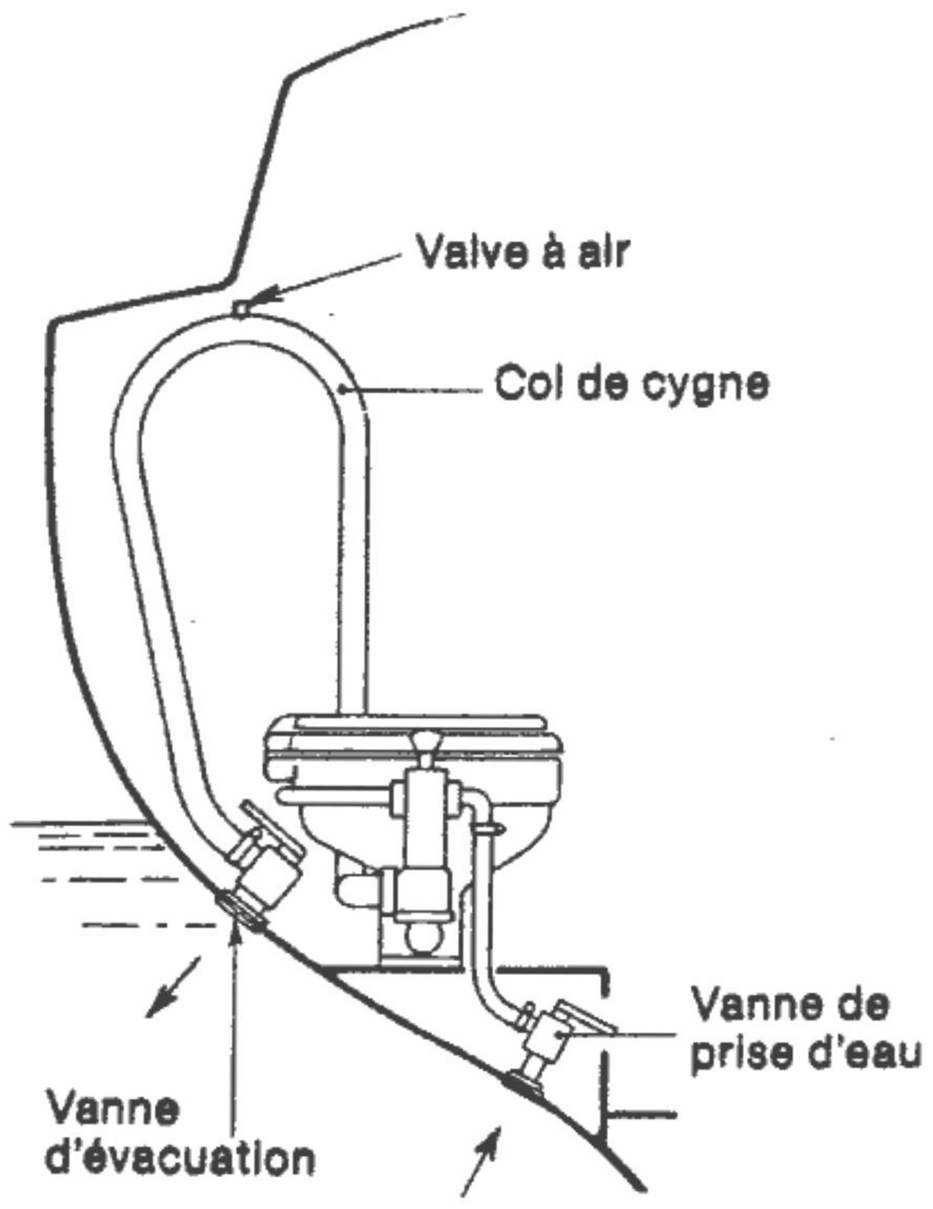


Fig. 8-10 • Installation d'un w.-c. marin.

Pour éviter tout risque de siphonnage, une valve doit être montée au sommet du col-de-cygne. Pour éviter les odeurs qui pourraient s'en dégager, on l'équipera d'un tube débouchant à l'extérieur du rouf par un petit col-de-cygne ou une grille comme les évents des réservoirs de carburant. Afin de contrôler que ce col-de-cygne est bien vide et déceler éventuellement les corps étrangers qui pourraient obstruer la canalisation, on utilisera pour celle-ci du tuyau souple transparent. Ici aussi, attention aux coudes trop brusques, il faut également soutenir le col-de-cygne par des colliers. Par ailleurs, comme il n'est pas très agréable de voir passer les déchets lors de l'évacuation, on le placera dans le fond d'une penderie ou sous un coffrage facilement amovible.

Lorsque l'évacuation à la mer est prohibée, les déchets et eaux usées devront être stockés dans un système de rétention ou recyclés par un système de recirculation. Ces systèmes devront répondre à la norme internationale ISO 8099.

Tous les tuyaux en vinyle souple seront bloqués sur les embouts cannelés par des colliers à serrage à vis en inox, genre *Flexinox*. Ne pas mettre de pâte d'étanchéité qui empêcherait le plastique de s'incruster dans les cannelures. Il est bon également de placer entre le collier et le tuyau une plaquette de plastique ou de néoprène dur pour éviter que le collier ne coupe le tuyau. Si l'embout est assez long, on pourra placer deux colliers côte à côte. Ceci est d'ailleurs obligatoire sur les passe-coque et vannes débouchant à l'extérieur.

Les montages sont analogues pour une alimentation d'évier en eau de mer. Il faut veiller particulièrement à la bonne accessibilité des vannes, au besoin en installant une rallonge permettant de les commander à distance.

Pour éviter que les bondes d'éviers ou de lavabos ne sautent à la gîte, sous l'effet des coups de bélier provoqués dans la canalisation par les mouvements du bateau, il faut repiquer sur la conduite d'évacuation, entre la vanne et la cuvette, un évent débouchant à l'extérieur du rouf.

Si l'on désire pouvoir utiliser l'évacuation de l'évier ou du lavabo, même lorsque ceux-ci se trouvent au-dessous de la flottaison, on doit obligatoirement disposer d'un réservoir de récupération des eaux usées dont la vidange est effectuée régulièrement par une pompe, généralement électrique.

Comme pour les w.-c., il faut veiller avec soin à la compatibilité des matériaux constituant les vannes passe-coque d'une part, la pompe à eau et l'évier d'autre part.

On s'arrangera également pour placer la prise d'eau de mer sur le bord opposé à celui de l'évacuation des w.-c. pour des raisons bien compréhensibles.

S'il est facile, comme nous l'avons déjà vu à propos de l'installation motrice, de grouper les prises d'eau de mer, cela est plus difficile pour les évacuations.

Le fait que la vanne, qui doit être ouverte juste au moment de l'utilisation, ne se trouve pas à proximité est une gêne permanente. Même la jonction lavabo w.-c, n'est pas possible puisque, placée sur la vanne, il y aurait de gros risques de refoulement et, placée directement à la sortie de la pompe, le col-de-cygne empêcherait l'écoulement.

Il ne reste plus, dans ce cas, que la solution qui consiste à vider le lavabo directement dans la cuvette des w.-c. et, sur un gros bateau, on conçoit l'intérêt d'un réservoir de récupération.

2 LE CIRCUIT D'EAU DOUCE

La première chose à déterminer sera la quantité d'eau douce à prévoir. G. PESTY donnait une estimation qui me semble correcte et je la reproduis ci-dessous.

Comme on le voit, ces quantités peuvent devenir très élevées sur un voilier de taille importante et, dans ce cas, il pourra être plus intéressant sur le plan du poids d'installer un petit appareil de dessalinisation qui fournira la quantité journalière nécessaire.

Il sera cependant indispensable de prévoir un réservoir de secours indépendant, d'une capacité suffisante pour permettre de rejoindre le port le plus proche. Dans tous les cas, les réserves devront être fractionnées pour parer aux risques de contamination ou de fuites.

	Nombre de jours	Nombres de personnes	Nombre de litres/jour	Total
Petite croisière	4	6	24 à 48	96 à 192
Petite traversée	6	4	16 à 32	96 à 192
Croisière hauturière	15	4	16 à 32	240 à 480
	21	4	16 à 32	336 à 672

a ▪ Réservoirs

Pour les petits bateaux, le réservoir sera un simple jerricane plastique alimentaire que l'on pourra soit placer au-dessus de l'évier en l'équipant d'un robinet verseur, soit laisser en dessous en y puisant l'eau avec une pompe à main ou même électrique.

Sur les bateaux plus importants, les réservoirs peuvent être souples ou rigides. Les premiers sont réalisés en néoprène armé. Ils ont l'avantage de ne contenir pratiquement pas d'air, ce qui assure une meilleure conservation de l'eau. Ils ne doivent pas être placés n'importe où et n'importe comment. On évitera, en particulier, de les faire porter sur des arêtes vives, des têtes de boulons et de rivets qui pourraient provoquer des points d'usure par frottement. La poche doit être parfaitement calée et, au besoin, fixée lorsque des œillets sont prévus à cet effet. Toutes sortes d'embouts de raccordement sont prévus pour ces réservoirs dont les capacités peuvent aller de **25** à **120** litres. Les réservoirs rigides peuvent être métalliques : acier galvanisé, acier inoxydable, alliage léger, ou en matière plastique, stratifié ou PVC rigide de qualité alimentaire. L'alliage léger sera de même qualité que celui utilisé pour les coques, c'est-à-dire en A-G4 MC. Mais attention qu'aucun des éléments de la conduite, robinets, raccords, etc., ne soit en alliage cuivreux !

Pour éviter de trop grandes variations d'assiette et être le moins néfastes possible pour les mouvements de la coque, les réservoirs seront répartis à distances égales du centre de gravité et le plus près possible de celui-ci.

Quels que soient les matériaux utilisés pour la réalisation d'un réservoir, il faut suivre un certain nombre de règles qui sont très voisines de celles d'un réservoir à carburant. Tout d'abord un réservoir doit être solidement fixé dans toutes les directions. Le poids d'un réservoir de **100** litres plein est le même que celui d'un moteur de **8** à **12** kW. La fixation pourra se faire soit en le bloquant dans un berceau fermé (réservoir en stratifié en particulier), soit en utilisant le prolongement des flasques du réservoir lui-même (réservoir en métal ou PVC) ou des pattes soudées (réservoir en métal).

Seuls les réservoirs des coques métalliques peuvent faire partie intégrante de celle-ci. Deux réservoirs voisins seront toujours séparés par un espace vide ou *cofferdam*.

Le nettoyage doit pouvoir s'effectuer facilement, soit en laissant amovible le dessus du réservoir qui sera fermé avec un joint en néoprène et de nombreux boulons peu espacés, soit en munissant le dessus d'une large tape. On peut à cette fin utiliser des tapes de pompes Henderson.

Un réservoir doit toujours être divisé par des cloisons ou baffles percées afin de laisser en communication les différents compartiments.

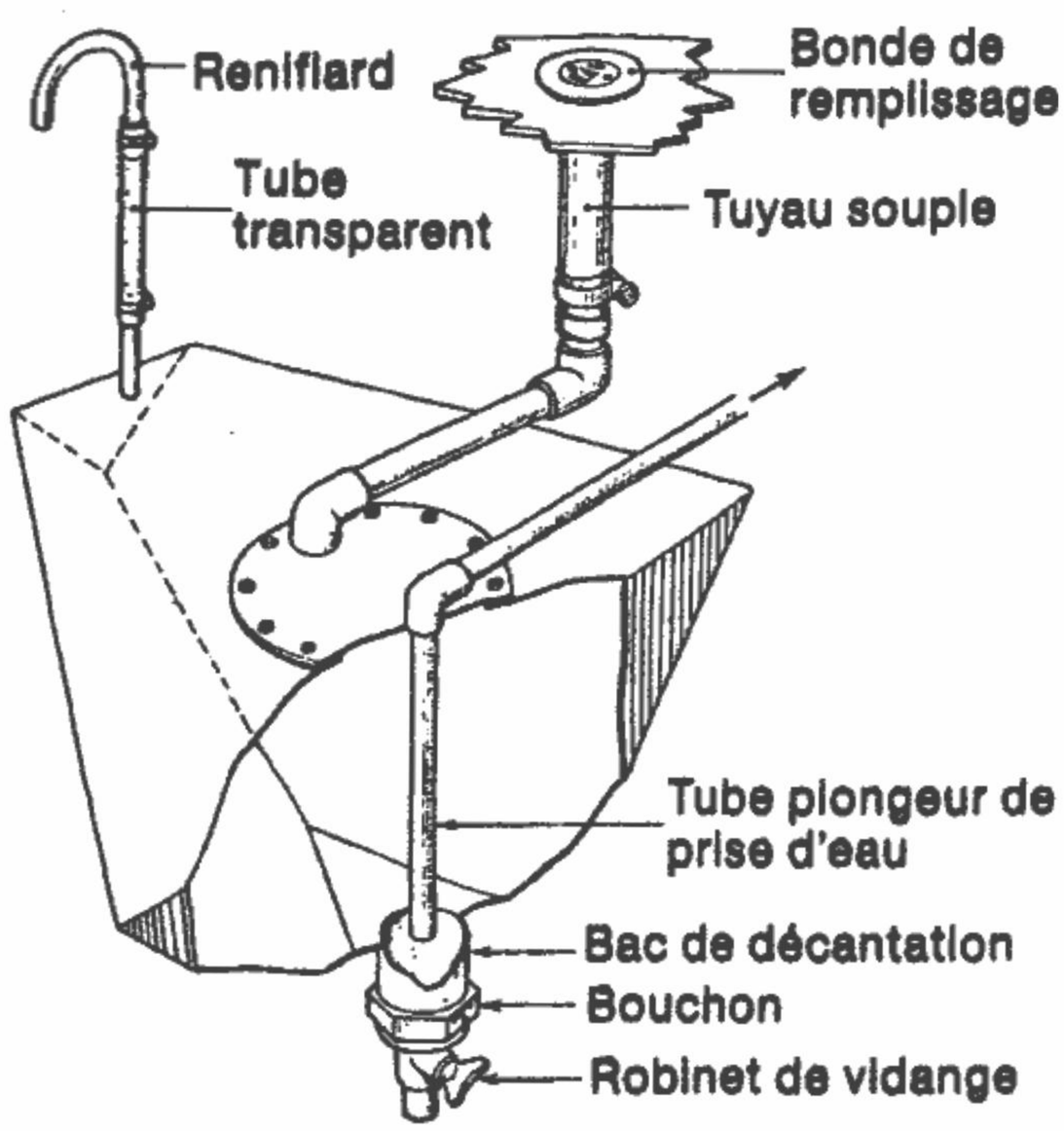


Fig. 8-11 • Disposition d'ensemble d'un réservoir à eau douce. Le bac de décantation au point le plus bas permet de récupérer facilement les boues.

Le volume unitaire de ceux-ci doit se situer autour de **20** dm³. La masse d'eau en mouvement lors de coups de gîte ou de tangage est ainsi fractionnée, diminuant les contraintes sur les parois du réservoir.

Le remplissage du réservoir s'effectuera de préférence par l'intermédiaire d'une canalisation et d'un nable étanche monté sur le pont ou le toit du rouf (FIGURE **8-11**). Il faut faire très attention d'éloigner les bouchons d'eau et de carburant et les munir de signes distinctifs, parfaitement lisibles, pour éviter tout risque d'erreur. Elle serait plus grave sans doute que celle qui s'est produite à bord du cuirassé *Jean-Bart*, en 1940, lorsque s'échappant de Saint-Nazaire, on avait, dans la hâte du départ, rempli les caisses à eau... avec du vin, qui coulait sur tous les lavabos.

Un filtre sur le circuit de remplissage évitera de contaminer le réservoir, mais il devra être d'une section suffisante pour ne pas restreindre le débit souvent élevé des manches à eau.

Pour que l'eau puisse pénétrer dans le réservoir, il faut, bien sûr, que l'air puisse s'en échapper et pour cela il doit être muni d'un reniflard. Ce petit tube vertical, terminé par un coude à 180°, sera placé à l'intérieur du bateau (contrai-

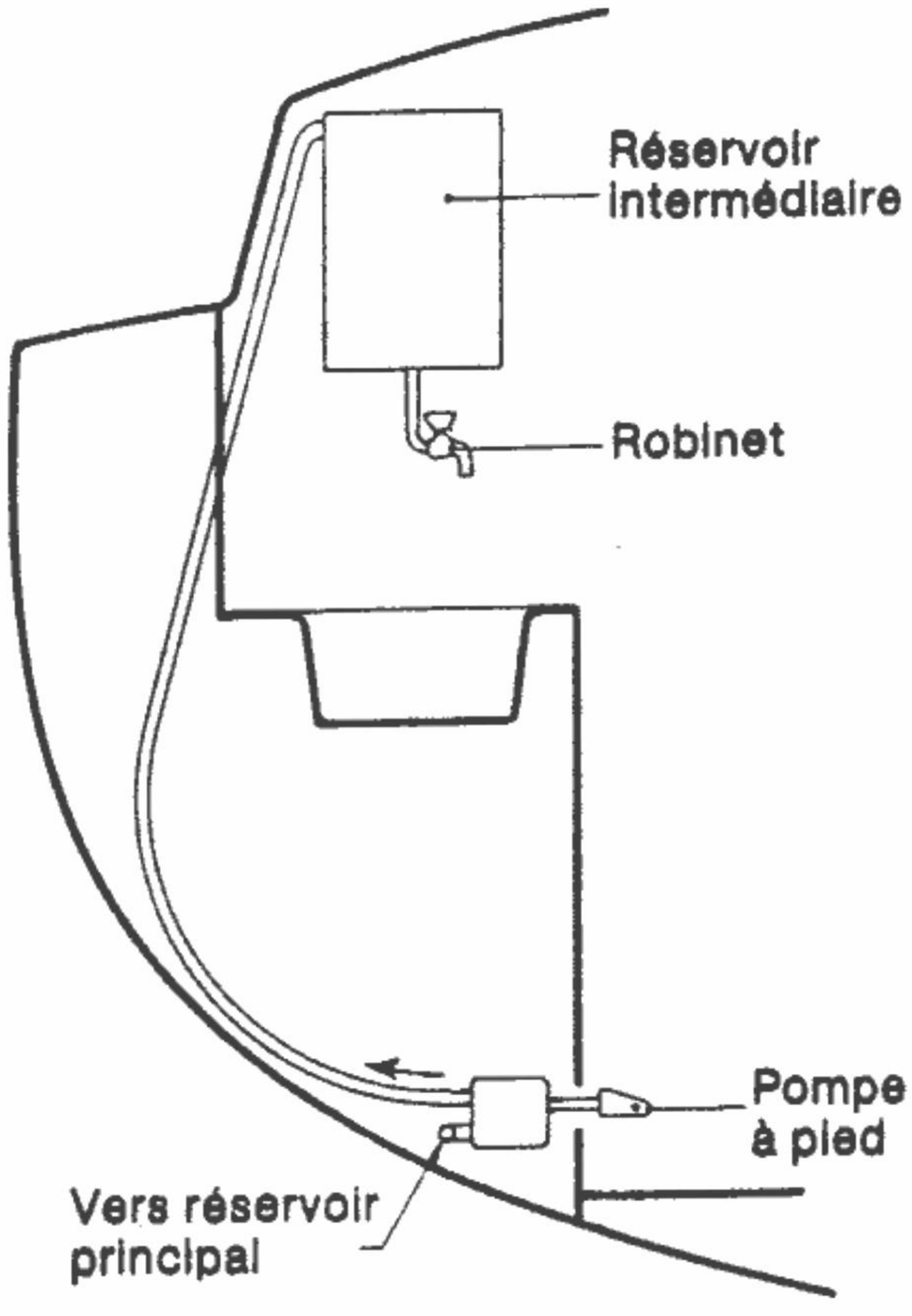


Fig. 8-12 • Eau courante par réservoir en charge.

rement au reniflard du réservoir de carburant), le plus haut possible pour éviter tout débordement à la gîte, et de préférence au-dessus d'un lavabo pour ne pas retrouver le bateau plein d'eau lors du remplissage. Il peut être bon, pour surveiller celui-ci, de prévoir une partie verticale de la canalisation du reniflard en plastique transparent.

Le réservoir doit comporter un point bas où pourront se décanter les impuretés qui sont malheureusement toujours en suspension dans l'eau. Le mieux est de prévoir, à cet endroit, un petit bac de décantation dont le fond puisse se dévisser pour permettre un nettoyage facile. Sur ce bouchon, on montera un robinet de vidange.

Ceci nécessite de disposer sous le réservoir d'un certain espace, mais permet un entretien facile.

La prise d'eau est constituée, d'un tube plongeant dans le réservoir à hauteur du point bas et fixé sur une tape au-dessus du réservoir.

La forme du réservoir doit être conçue de telle façon que, aux angles de gîte normaux (jusqu'à **30°** environ), le point bas se trouve toujours être vraiment... le plus bas. On sera sûr ainsi que les dépôts d'impuretés ne seront pas remélangés à l'eau et que la prise d'eau ne désamorcera pas.

Un filtre à charbon actif sera placé à la sortie du réservoir. Il devra être facilement accessible pour le changement de la cartouche. Un robinet d'arrêt sera également prévu pour éviter tout siphonnage hors des périodes d'utilisation.

Dans le cas où deux réservoirs séparés sont placés de chaque bord, si le remplissage et la prise d'eau leur sont communs, ils doivent comporter une vanne à trois voies, de façon à pouvoir les isoler. Faute de quoi, à la gîte, le réservoir au vent se viderait dans celui sous le vent.

Les canalisations seront souvent, sur les petits bateaux, réalisées en PVC souple (attention à la qualité). Sur les plus gros, le PVC rigide sera très préférable au cuivre. Lors de l'hivernage, lorsque le circuit a été purgé, le cuivre se couvre en effet de vert-de-gris, poison violent qui nécessite un décapage et un nettoyage fastidieux avant la remise en service. De plus, beaucoup de pompes comportant des corps en alliage léger, des risques de corrosion rapide sont à craindre.

Par ailleurs, le PVC rigide offre de grandes facilités de mise en œuvre. Seules précautions indispensables : prévoir des joints de dilatation, des cols de cygne ou des éléments souples pour absorber les différences de dilatation et les déformations du bateau.

Afin de permettre la vidange complète des circuits avant l'hivernage, prévoir des robinets de purge aux points bas.

b ▪ La distribution

Le premier moyen de distribution de l'eau est la pompe mécanique à main combinée avec le bec verseur ou la pompe à pied reliée à un bec séparé.

On choisira, de préférence, un matériel réalisé en majorité en matière plastique pour minimiser les risques de corrosion. L'installation doit permettre un accès facile pour l'entretien.

Un des moyens les plus simples et les plus économiques de disposer d'eau courante consiste à monter un réservoir en charge au-dessus du point d'eau. Rempli par une petite pompe à pied ou électrique, selon les besoins, il permet de contrôler la consommation. Son inconvénient est de placer du poids dans les hauts (FIGURE **8-12**).

Mais, la plupart des installations d'eau courante utilisent des pompes électriques commandées soit par un interrupteur sur le robinet, soit par un contacteur à dépression. Le débit demandé étant faible, on préférera aux pompes rotatives les pompes à membranes qui s'amorcent sans être en charge et peuvent donc ne pas être placées directement dans les fonds (FIGURE **8-13**).

Pour éviter des risques de vidange accidentelle du réservoir, en cas de fuite ou de court-circuit, le circuit des pompes sera isolé par un interrupteur général au tableau et un fusible protégera chaque pompe des surcharges accidentelles.

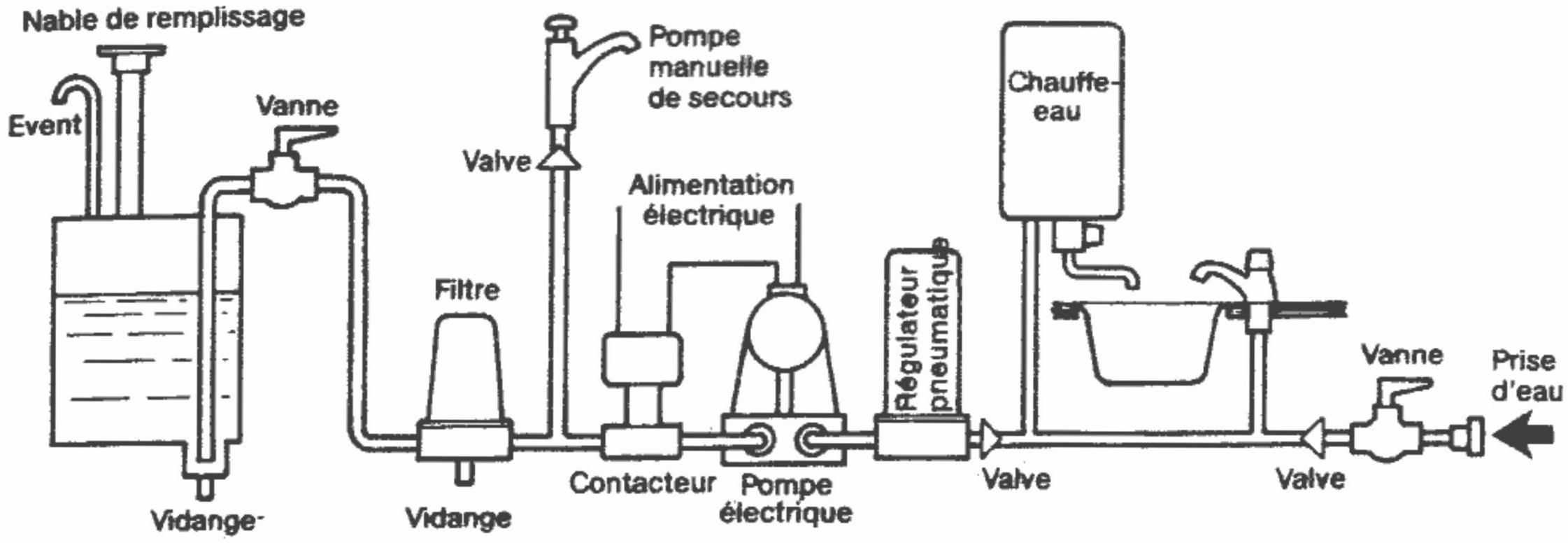


Fig. 8-13 • Circuit d'eau sous pression à déclenchement par dépression. A noter deux accessoires fort utiles, une pompe manuelle entre le filtre et le groupe de pompage, en cas de panne, et une alimentation directe par prise d'eau extérieure. Attention aux valves antiretour nécessaires, et éventuellement au détendeur si la pression est trop forte.

On veillera particulièrement à l'isolement électrique des pompes et à leur facilité d'entretien (remplacement de la membrane et des clapets). Un régulateur pneumatique sera monté en sortie de la pompe pour amortir les coups de bélier et permettre d'éviter le déclenchement de la pompe lors de tirages de petites quantités d'eau.

En aucun cas, cependant, une installation d'eau sous pression ne dispense de la présence d'une pompe mécanique pour une raison évidente de sécurité. Son piquage sera pris entre le filtre et la pompe électrique et sera muni d'un clapet antiretour pour éviter le désamorçage de celle-ci.

Comme pour l'électricité, l'alimentation en eau peut se faire à partir d'une borne de quai. Mais, quelques précautions sont à prendre. La première est de s'assurer que l'installation est capable de supporter la pression, sinon il faudrait prévoir un détendeur. Un clapet antiretour sera placé à la sortie du détendeur pour éviter que le réservoir ne se vide par cette canalisation en cas de mise en route accidentelle de la pompe robinets fermés.

La seconde est de placer un clapet antiretour à la sortie de la pompe pour ne pas interférer avec celle-ci et que le réservoir ne puisse se remplir et déborder si l'on a omis de fermer son robinet.

Enfin le raccord servant au branchement du tuyau de raccordement devra être muni d'un bouchon parfaitement étanche pour éviter toute introduction d'eau de mer. Une dernière précaution, ne jamais utiliser de graisse minérale pour les appareils des circuits d'eau douce mais uniquement des graisses à base de vaseline, lanoline ou silicone.

c ▪ L'eau chaude

Une installation d'eau chaude peut être réalisée soit à partir d'un chauffe-eau classique à gaz ou électrique, soit par un système combiné avec le refroidissement du moteur (Volvo) ou avec le chauffage (Schneebeli-Chabaud).

Un chauffe-eau à gaz doit répondre aux conditions générales des appareils à flamme nue et, de plus, être placé dans un local où le renouvellement d'air sera suffisant pour éviter tout risque de baisse trop importante du taux d'oxygène.

3 ÉPUISEMENT, ASSÈCHEMENT

En attendant la publication de la norme ISO 150 83, la réglementation française à ce jour prévoit, à partir de la 3ème catégorie, deux pompes fixes dont l'une mécanique ou électrique et l'autre, à bras, manœuvrable tous panneaux fermés. Ce dernier point implique que cette pompe puisse être manœuvrée de l'extérieur et de l'intérieur du bateau ou que l'une des pompes mécaniques puisse être manœuvrée de l'intérieur et l'autre de l'extérieur. Dans les deux cas, l'emplacement doit être choisi pour permettre une manœuvre facile et sans fatigue anormale.

Dans tous les cas, quelle que soit la solution adoptée, dès lors que le bateau est muni d'un moteur, celui-ci sera équipé d'une pompe mécanique attelée. Celle-ci entraîne généralement, comme les pompes électriques, un rotor en néoprène qui ne doit en aucun cas tourner à sec.

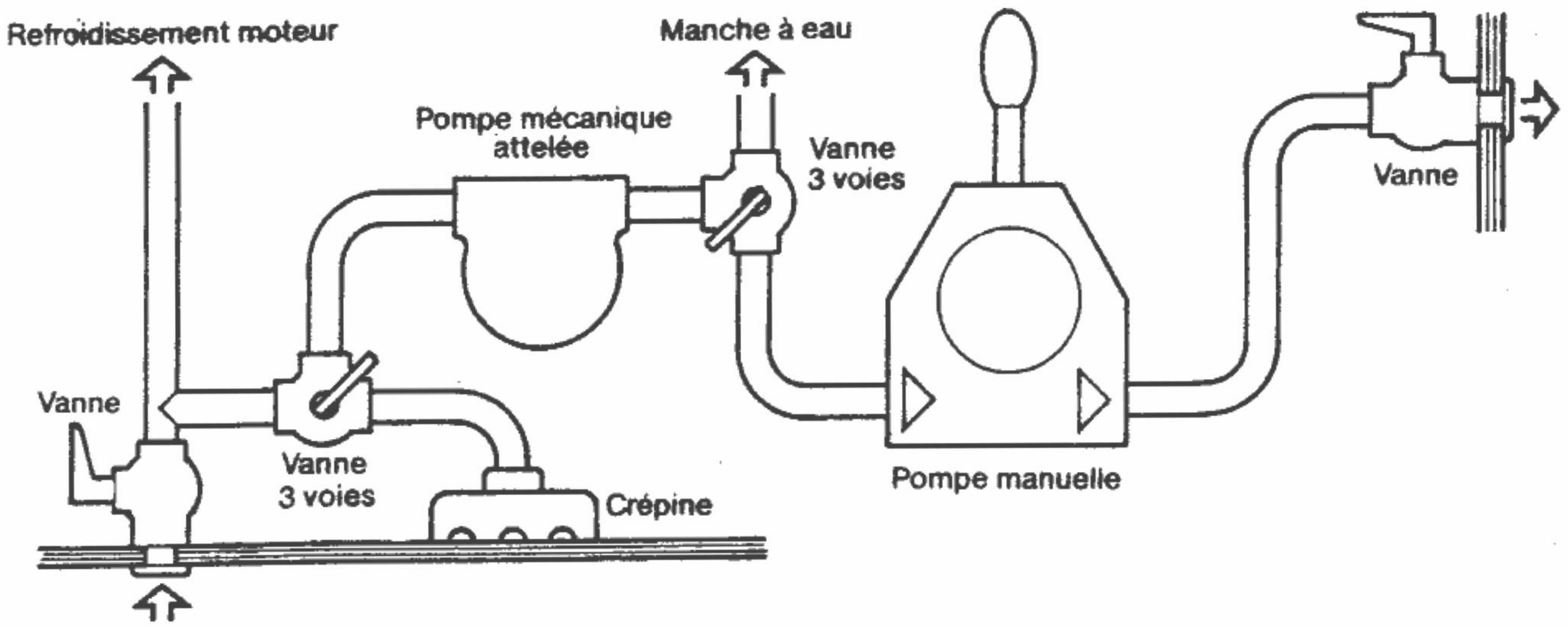


Fig. 8-14 • Circuit d'évacuation avec pompes mécanique et manuelle en série. Attention, toutes les pompes mécaniques n'acceptent pas la traversée en direct et il peut être nécessaire de prévoir un by-pass. Un repiquage sur le circuit de refroidissement du moteur et deux vannes à 3 voies permettent d'alimenter une manche à eau fort utile pour la lutte contre l'incendie ou pour le nettoyage.

Pour éviter ce risque, la pompe sera débrayable ce qui nécessite une étroite surveillance en fin de pompage ou couplée avec celle de refroidissement du moteur, une communication entre les deux corps assurant la lubrification. Un clapet antiretour sera placé en amont de la pompe pour faciliter l'amorçage et éviter surtout une déviation de l'eau de refroidissement du moteur vers la cale.

Les pompes électriques seront en général du type immergé avec ou sans déclenchement automatique. Attention, ce qui peut être une facilité ou une sécurité peut se révéler mortel pour les batteries si le contacteur, placé trop bas, se déclenche dès la présence du moindre litre d'eau ou en cas de fuite du circuit d'eau douce. Elles doivent être conformes à la norme ISO 8846.

L'aspiration des pompes se fera, bien sûr, au point le plus bas de la cale par une crépine qui devra être immédiatement accessible (pas sous un réservoir comme j'ai eu l'occasion de le voir). Les pompes mécaniques à membrane pouvant « absorber » des débris assez gros, la crépine sera percée de gros trous pour ne pas se boucher à la moindre occasion.

L'évacuation se fera sur le bordé par un passe-coque placé sous le liston et dont la vanne sera parfaitement accessible. Les tuyaux seront en plastique annelé pour résister aux pressions et dépressions qui peuvent être très fortes. Ils seront soutenus et protégés sur leur parcours de façon à ne pouvoir être écrasés ou déplacés.

Pour ne pas multiplier les conduites et les passe-coque, on peut brancher plusieurs pompes en série sur un seul circuit, mais la pompe à rotor sera toujours placée le plus près de la crépine.

Dès lors que l'on dispose d'une pompe motorisée, il est très intéressant de pouvoir l'employer pour d'autres usages de nettoyage ou de lutte contre l'incendie. Il suffira pour cela de prévoir deux vannes à trois voies, la première en amont permettant de passer de la crépine de cale à la prise d'eau du moteur et la seconde, en aval, dirigeant l'évacuation vers un raccord placé sur le pont. Une manche à eau d'une longueur égale à celle du bateau viendra s'y brancher et sera équipée d'une buse réglable permettant de passer du jet plein à la pulvérisation (FIGURE **8-14**).

D ▪ LE FROID

Même si certains grands navigateurs se passent facilement des moyens de conservation par le froid, ils ne sont pas la majorité et beaucoup de voiliers de croisière sont équipés de glacières, de réfrigérateurs (± **5**°C), voire de conservateurs (-**18**°C) ou même de congélateurs (- **25**°C) pour les plus grands.

Quels que soient le degré de refroidissement désiré et la source de celui-ci, la première qualité d'un compartiment réfrigéré (ou enceinte thermique) est de consommer le minimum d'énergie, c'est-à-dire être isolé aussi bien que possible.

Cette isolation sera assurée, d'une part grâce à la conception de l'enceinte, d'autre part grâce au matériau utilisé pour assurer cette isolation.

Pour ceux qui seraient amenés à concevoir des installations complexes demandant des calculs précis, je leur conseillerai de se reporter à la référence (**2**).

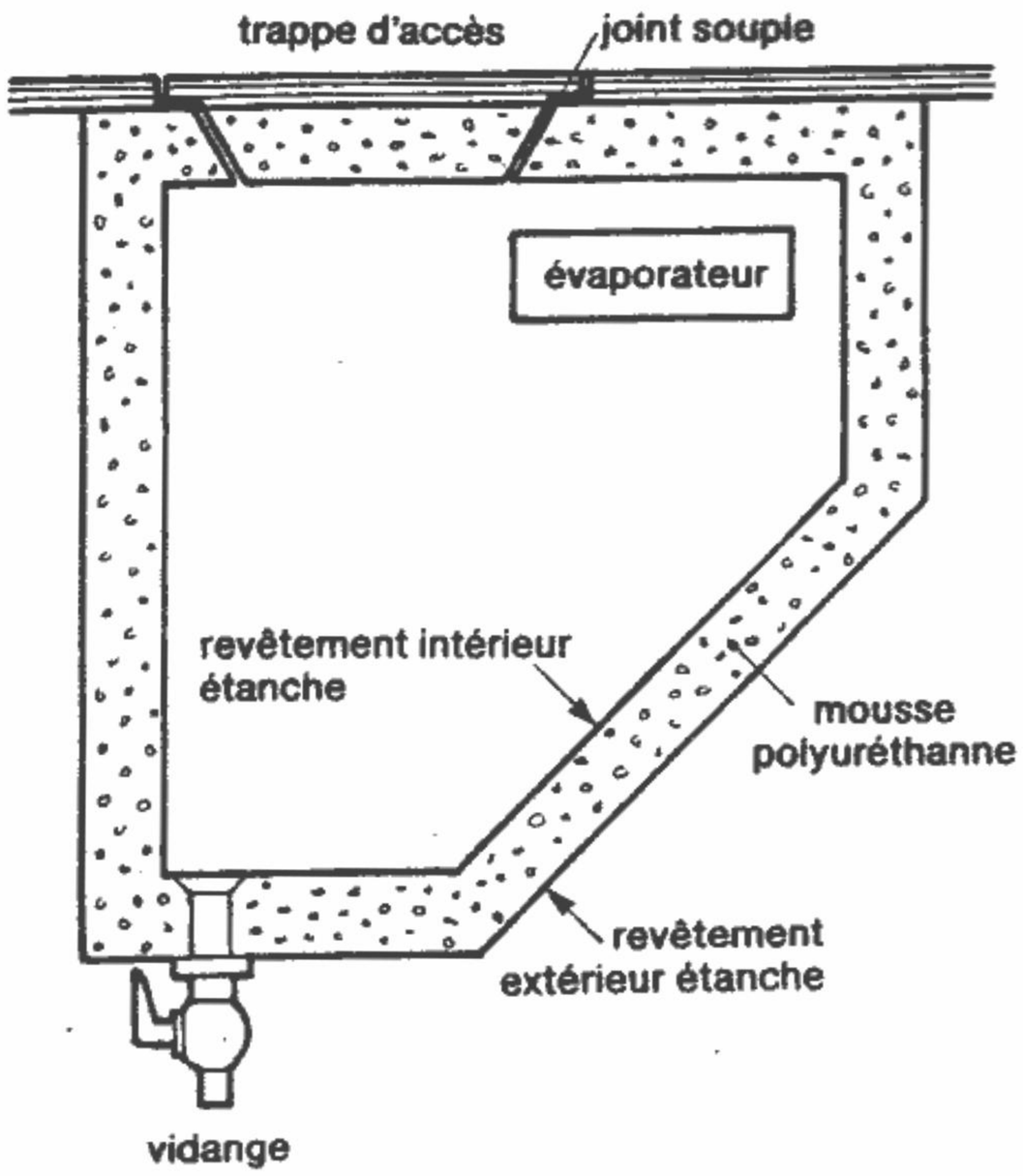


Fig. 8-15 • Détails d'un compartiment réfrigérant.

L'air froid étant plus lourd que l'air chaud, il ne pourra s'échapper si aucune ouverture n'est pratiquée dans le compartiment en dehors de sa surface supérieure. La trappe d'accès sera donc toujours placée sur le dessus et non en façade ou, si ce n'est pas possible, en haut de celle-ci. D'autre part, la source de froid, qu'il s'agisse du simple pain de glace ou de l'évaporateur, sera toujours placée en haut du compartiment. Enfin, la vidange de la cuve pour dégivrage et nettoyage, qui se fait par un orifice situé en son point le plus bas, sera obturée par un nable ou un robinet qui évitera, de plus, la remontée des mauvaises odeurs provenant de la cale qui pourraient contaminer les vivres conservés.

Je n'entrerai pas ici dans le détail des qualités des divers matériaux d'isolation possibles, il suffit de retenir que celui qui convient le mieux à bord d'un bateau est la mousse de polyuréthanne en plaque ou injectée *in situ* couramment utilisée en construction navale. Son épaisseur sera fonction de la différence de température à maintenir entre les deux parois de la cuve. Le tableau ci-dessus donne les épaisseurs moyennes en mm à respecter pour un compartiment réfrigérateur de **100** l et un conservateur de **50** l (FIGURE **8-15**).

Dans le cas d'une paroi en contact avec le compartiment moteur ou le réchaud, prévoir l'épaisseur supérieure.

	Glacière	Réfrigérateur	Conservateur
Fond	75	100	125
Côté	50	75	100
Dessus	25	50	75

Pour un calcul précis, les courbes de la FIGURE **8-16** donnent les épaisseurs de mousse de polyuréthanne à prévoir en fonction de la différence de température désirée entre l'extérieur et l'intérieur et des pertes en kilocalories par mètre carré et par 24 heures de surface extérieure de l'enceinte.

La puissance du condenseur devra être supérieure de 50 % aux pertes calculées.

Un compromis devra être trouvé entre le désir de restreindre les pertes, donc la durée de marche du compresseur, et le volume intérieur de l'enceinte, d'autant plus réduit que l'épaisseur de mousse est forte.

La mousse doit être collée à l'extérieur de la paroi de la cuve et, dans le cas d'une réalisation en plaques, les joints doivent être décalés ou à embrèvement.

Il ne doit y avoir aucune solution de continuité dans l'enveloppe isolante et, si elle est réalisée en feuilles ou blocs assemblés, ceux-ci doivent être parfaitement ajustés et collés

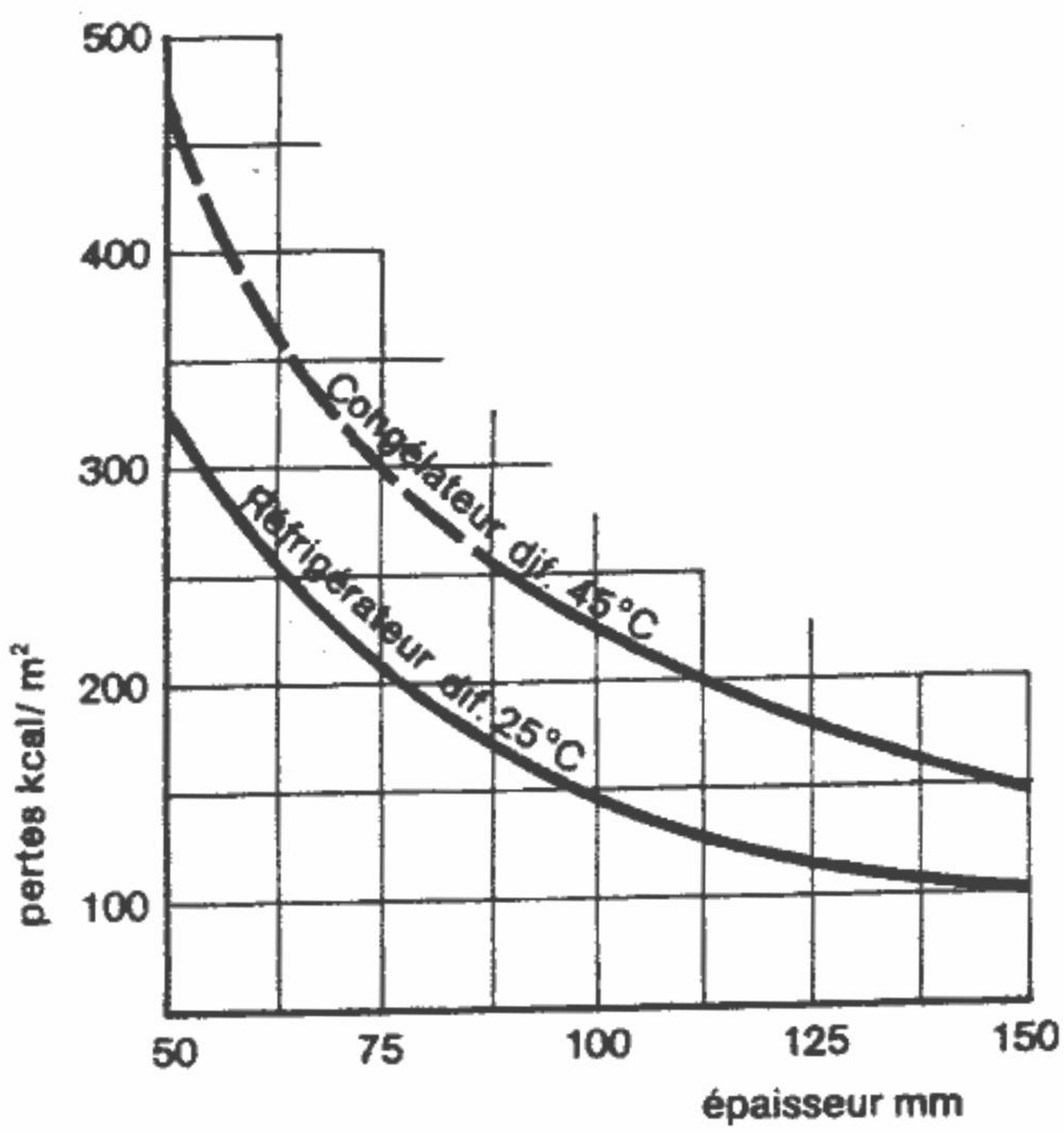


Fig. 8-16 • Pertes en kilocalories par mètre carré de surface extérieure d'une enceinte réfrigérante, en fonction de l'épaisseur de mousse de polyuréthanne pour des différences de température avec l'extérieur de 45°C et de 28°C. (*D'après Spa Creek Instruments*).

afin qu'il ne puisse se produire aucun pont thermique ni reprise d'humidité. L'enveloppe sera protégée extérieurement par une couche de mat enduit de résine polyester ou par une feuille d'aluminium collée avec joints à recouvrement. La trappe doit être de petites dimensions et assez lourde pour ne pas s'échapper à la gîte, ou mieux, munie d'une fermeture. Son étanchéité doit être assurée par un joint en caoutchouc souple.

Lorsqu'on prévoit deux compartiments, réfrigérateur et conservateur par exemple, il est préférable qu'ils soient indépendants avec chacun sa trappe. Il est très difficile, en effet, de maintenir la différence de température voulue par une communication entre les deux compartiments à partir d'un seul évaporateur dans le conservateur.

La cuve elle-même peut être en alliage léger, en acier inoxydable, en lamifié ou en stratifié à condition d'utiliser les résines et des gelcoats de qualité alimentaire. Son volume ne sera pas dicté par la quantité de vivres que l'on veut stocker, mais par la température que l'on désire obtenir et la puissance du groupe frigorifique que l'on peut installer.

Les groupes à absorption ou à effet PELTIER n'offrent que peu d'intérêt pour des installations fixes, du fait de leurs contraintes d'utilisation ou de leur faible apport frigorifique. Seuls les groupes à compression sont normalement utilisés à bord des voiliers de croisière. Un groupe à compression se compose essentiellement de trois éléments, un compresseur qui envoie le gaz frigorifique dans un condenseur où, en passant de l'état gazeux à l'état liquide, il libère les calories absorbées, et un évaporateur dans lequel le gaz liquéfié s'évapore en absorbant les calories environnantes.

Le compresseur est entraîné par un moteur qui peut être le moteur auxiliaire, auquel cas un embrayage électromagnétique assure l'entraînement au moment opportun, ou un moteur électrique. Les moteurs de certains groupes peuvent fonctionner sur **12-24** V = ou **220** V~ ce qui permet, au port, de les alimenter directement depuis une borne de quai.

La consommation d'un groupe à compression est extrêmement variable selon la température extérieure, le rendement du condenseur et l'isolation de l'enceinte thermique. On prendra donc comme base très approximative et pour nos climats tempérés les valeurs suivantes (VOIR TABLEAU CI-CONTRE).

On distingue les groupes fermés ou « hermétiques » dans lesquels moteur et compresseur forment un seul élément étanche et les groupes ouverts où tous deux sont indépendants. C'est la solution la plus couramment utilisée à bord des bateaux, car elle offre une plus grande souplesse d'installation et permet des réparations plus faciles.

Le condenseur, de par sa fonction, demande une très bonne circulation d'air frais pour évacuer les calories qu'il dégage. C'est souvent là la source de pertes de rendement importantes conduisant à une consommation d'énergie prohibitive. De plus, la chaleur qu'il dégage à l'intérieur de la coque ne correspond généralement pas aux périodes où l'on recherche la fraîcheur pour les vivres. Une solution consisterait-elle à le placer dans le cockpit sous les bancs ?

C'est pourquoi le condenseur à refroidissement à air n'est utilisé que pour les réfrigérateurs et est souvent remplacé par un refroidissement à eau qui peut se faire, soit directement par un tube fixé sous la carène, soit par un échangeur avec circulation d'eau. Cette circulation s'opère soit en série sur le circuit de refroidissement du moteur lorsque le compresseur est entraîné par celui-ci, soit par une pompe liée au compresseur. Ce système est indispensable pour les réfrigérateurs de plus de **100** l, les conservateurs et congélateurs.

L'évaporateur est du même type que ceux des réfrigérateurs domestiques et permet la fabrication de glaçons. Mais pour les grands volumes, les conservateurs et les congélateurs, on utilise des plaques eutectiques dont le rendement est très supérieur. Il s'agit d'évaporateurs noyés dans un mélange d'eau et de glycol qui gèle à une température fixe qui est fonction de la proportion du mélange, le tout étant contenu dans une enceinte close, généralement en acier inoxydable. Au bout d'une heure ou deux environ, une fois le liquide gelé, le groupe s'arrête et celui-ci restitue les frigories emmagasinées en fondant à température constante, exactement comme le ferait un bloc de glace, mais à une température beaucoup plus basse. Un mélange à 10 % correspondra à une température de - 2°C et un mélange à 33 % à - 18°C.

La plaque eutectique ne doit pas être collée contre la cuve, mais laisser un jour de quelques centimètres pour que toutes les faces soient en contact avec l'air environnant. L'ensemble du circuit est complété par un réservoir, un filtre déshydratant, parfois équipé d'un voyant de contrôle, un détendeur thermostatique et différentes vannes, le tout étant commandé par un thermostat.

Dans une cuve de grande contenance il est souvent difficile d'avoir accès aux vivres stockés dans le fond. Pour faciliter le rangement, le mieux est de prévoir des paniers coulissants en matière plastique, en acier inoxydable ou en métal plastifié, de dimensions correspondant à la trappe.

Capacité	Réfrigérateur	Conservateur
50 l	200 W/24 h	350 W/24 h
75 l	250 W/24 h	450 W/24 h
100 l	350 W/24 h	600 W/24 h
200 l	450 W/24 h	800 W/24 h
350 l	550 W/24 h	—
500 l	700 W/24 h	—

E ■ LE CHAUFFAGE

La notion de confort et les durées d'utilisation des bateaux s'accroissant, un mode de chauffage est de plus en plus souvent demandé par les propriétaires.

En dehors des appareils mobiles qui n'intéressent pas l'architecte, et des poêles classiques à charbon ou combustible liquide que l'on trouve souvent chez nos voisins nordiques, et qui nécessitent l'installation d'une cheminée sérieuse, deux types d'installation peuvent être montés sur un voilier, le chauffage à air pulsé et le chauffage à circulation d'eau.

Le premier s'adapte à toutes les tailles de voilier, permet d'utiliser le même carburant que le moteur, est instantané et assèche l'air ambiant, ce qui est généralement intéressant, mais peut parfois devenir inconfortable si le chauffage est utilisé de façon intensive.

Le principe de ces appareils est sensiblement identique chez tous les fabricants. Il consiste en un échangeur de chaleur entre une chambre contenant un brûleur* et une gaine entourant celui-ci dans laquelle un ventilateur propulse de l'air frais. Les deux circuits d'alimentation du brûleur avec évacuation des gaz brûlés et d'air frais pulsé sont totalement indépendants. Il est très important de choisir l'emplacement de la cheminée d'évacuation des gaz brûlés de telle façon qu'il n'y ait aucun risque de retour vers les emménagements. L'air frais peut être pris à l'extérieur ou à l'intérieur, constituant alors une sorte de circuit fermé qui permet une économie d'énergie, mais présente l'inconvénient de recycler les odeurs et d'entraîner un appauvrissement progressif de l'air qui peut être très dangereux.

On peut éventuellement prévoir une vanne permettant d'utiliser l'admission intérieure par temps très froid seulement. Un renouvellement régulier sera de toute façon indispensable.

L'air chaud est conduit par des gaines isolantes vers les divers compartiments où il débouche par des buses réglables. Un thermostat peut piloter l'installation. La puissance de ces appareils est donnée en kilocalories/heure ou en wattheures : **1** Kcal = **1,16** W. Sous nos climats tempérés, on estime qu'il faut environ **100** Kcal/h par m³ de volume à chauffer. La consommation de gazole est faible, de **0,30** l/h pour **2 000** kcal/h à **1,2** l/h pour **10 000** kcal/h. Par contre, celle de courant électrique, entraînée surtout par le ventilateur, est élevée, de **35** W/h pour **2 000** kcal/h à **150** W pour **10 000** kcal/h. Mais, il faut penser que, sauf si le bateau est utilisé comme résidence secondaire, le chauffage ne sera qu'intermittent. Le carburant utilisé peut également être du kérosène ou du gaz, mais ils sont moins économiques que le gazole et nécessitent une installation plus complexe.

* On préférera un brûleur à carburateur, qui fonctionne quelle que soit la gîte, plutôt qu'un brûleur goutte à goutte.

Le chauffage à circulation d'eau est réservé à des voiliers de plus d'une quinzaine de mètres habités de façon quasi permanente. L'installation est analogue à celle d'un chauffage domestique avec chaudière, vase d'expansion, pompes de circulation et convecteurs. Les carburants utilisés sont les mêmes que pour le chauffage à air pulsé.

Le système avec récupération de la chaleur des gaz d'échappement du moteur n'a guère d'intérêt pour un voilier.

S'il est décidé qu'un chauffage sera installé, il est important de s'intéresser à l'isolation de la coque. Celle-ci pourra être assurée au niveau du bordé et du pont par des vaigrages ou une structure sandwich. Il sera plus difficile, en revanche, de réduire les pertes au niveau des surfaces vitrées et des capots et surtout de trouver un compromis convenable avec l'indispensable renouvellement de l'air par les aérateurs.

F ■ LUTTE CONTRE L'INCENDIE

La réglementation concernant la lutte contre l'incendie est très précise. La norme ISO 9094 ne concerne que les navires de longueur inférieure ou égale à **15** m. Au-delà, c'est pour l'instant la réglementation française qui reste valable.

L'extinction par l'eau n'est obligatoire que sur les navires à moteur de plus de **15** m, mais ce n'est pas une raison pour s'en priver, dès lors que l'on dispose d'une pompe attelée ou électrique. L'eau reste en effet le meilleur moyen de lutte contre les feux dits « secs » (feux de classe A), surtout si elle est pulvérisée, et même sous cette forme, pour les feux « gras » (classe B). Pour ceux-ci et les feux « électriques » (classe C) les extincteurs sont divisés selon deux affectations : le compartiment moteur et les emménagements.

Pour le compartiment moteur, l'efficacité des extincteurs est liée à la puissance totale des moteurs :

- jusqu'à **150** kW	1 extincteur 21 B par moteur
- de **150** kW à **300** kW	1 extincteur 34 B pour un moteur 2 extincteurs 21 B pour 2 moteurs
- plus de **300** kW	1 extincteur 55 B et autant d'extincteurs complémentaires qu'il est nécessaire pour couvrir la puissance du moteur. S'il y a 2 moteurs, un extincteur 34 B et 55 B pour chacun et autant d'extincteurs qu'il est nécessaire pour couvrir la puissance totale.

Ces extincteurs devront être placés à proximité du compartiment, mais non sur ses parois où les flammes risqueraient d'empêcher de les atteindre.

Un orifice obturé par un volet ou un diaphragme perçable sera aménagé sur les faces immédiatement accessibles du compartiment, pour y passer la buse de l'extincteur.

Pour les voiliers habitables, le nombre d'extincteurs du type 21 B à prévoir, en plus de ceux du moteur, dépend de la longueur de coque :

de 15 à 20 m	2 extincteurs
de 20 à 25 m	3 extincteurs

L'un d'eux doit se trouver à l'entrée de la cuisine. En fait, il sera préférable de les disposer à proximité des différents accès aux emménagements en combinaison avec les extincteurs du compartiment moteur.

Si les installations fixes à gaz inerte ne sont obligatoires que sur les navires employant un combustible du premier groupe (essence) et dont le moteur est d'une puissance égale ou supérieure à **110** kW, ce type d'installation présente un intérêt certain pour tous les voiliers de croisière hauturière.

Le déclenchement pourra être commandé manuellement de l'extérieur du compartiment ou par un système de détection automatique. Sur les très grands voiliers, un signal doit avertir de l'envoi du gaz dans les locaux où des personnes peuvent être amenées à travailler.

Pour les voiliers de **15** m et au-dessous, la norme ISO 3941 prévoit quatre classes de feux :
classe A : feux mettant en jeu des matériaux solides, habituellement de nature organique, dont la combustion entraîne la formation de cendres rougeoyantes.
Classe B : feux mettant en jeu des liquides ou des solides liquéfiables.
Classe C : feux mettant en jeu des gaz.
Classe D : feux mettant en jeu des métaux.

Les feux électriques ne font pas l'objet d'une classe particulière.

Si la norme ISO 9094 définit les zones qui doivent être protégées : partie habitable, cuisine et compartiment moteur ainsi que l'emplacement des extincteurs relativement au point à protéger, elle ne précise pas si un même extincteur peut être commun à plusieurs zones, ni quel doit être le type de l'agent extincteur, sinon que le CO_2 est interdit pour les parties habitables.

On retiendra de cette norme extrêmement confuse qu'aucun point des parties habitables ne doit se trouver à plus de 5 m d'une sortie à l'air libre, distance réduite à 4 m si le passage doit se faire à côté ou au-dessus du compartiment moteur et que ce passage ne peut se faire au-dessus d'un appareil de cuisson à flamme nue. Les évacuations doivent avoir les dimensions minima indiquées PAGE 186.

Les navires équipés d'un moteur d'une puissance égale ou supérieure à **25** kW doivent être équipés d'extincteurs d'une capacité totale d'au moins **10A/68**B, un extincteur unitaire ne pouvant être inférieur à **5A/34**B.

L'extincteur du compartiment moteur doit utiliser un agent extincteur approprié pour noyer un espace clos et d'une capacité suffisante pour le volume concerné. Les voiliers de plus de **20** m doivent avoir au moins deux extincteurs dont un affecté au compartiment moteur. Les installations fixes à déclenchement manuel sont prévues et doivent utiliser un agent extincteur pour feux de type B et d'une capacité en rapport avec le volume clos à traiter. On peut penser, bien que cela ne soit pas précisé explicitement, qu'il ne peut s'agir que du compartiment moteur.

G ▪ MOUILLAGE ET AMARRAGE

L'équipement d'un voilier ne saurait être complet sans comporter le matériel nécessaire au mouillage et à l'amarrage. Nous verrons au chapitre suivant ce qui concerne l'accastillage de pont, mais auparavant il est bon de définir le matériel qui sera nécessaire, ancres, chaînes, guindeau, cordages, pare-battage constituant cet équipement.

En effet, bien que cette partie de l'armement relève de la responsabilité du propriétaire, l'architecte doit la connaître pour pouvoir conseiller son client, mais aussi pour en tenir compte dans son devis de poids, pour le choix de l'accastillage et pour prévoir les emplacements et rangements adéquats.

Toutes les caractéristiques données ci-dessous doivent être considérées comme des minimums pour un voilier de croisière correctement équipé.

1 LA LIGNE DE MOUILLAGE

En attendant la publication de la norme ISO 15084, le poids des ancres en fonction de la longueur et du déplacement du voilier et les caractéristiques minimums de la ligne de mouillage sont définis par la réglementation française pour le mouillage principal, un second mouillage n'étant obligatoire que pour les voiliers de plus de **9** m. La ligne de mouillage principale doit comporter une longueur de chaîne minimum de **8** m pour les voiliers de moins de **9** m et, égale à deux fois la longueur de la coque au-dessus de **9** m.

Pour le mouillage secondaire, la longueur de chaîne est de **8** m. La longueur totale minimum de la ligne, chaîne plus câblot sera égale à cinq fois la longueur de la coque.

Le poids des ancres est donné pour des ancres à grande pénétration (Britany, FOB, Danforth d'origine, CQR) avec une tolérance de ± **10** %. Il doit être majoré d'un tiers pour les ancres à jas et les ancres à bascule à massif arrière (ancres type Marrel).

Le matériau constitutif des ancres doit être l'acier, d'une résistance à la traction supérieure à **40** daN/mm² ou tout autre matériau offrant des garanties équivalentes.

On trouve depuis, dans le commerce, des ancres en alliage léger dont le poids serait moitié moindre que celles en acier pour une tenue annoncée égale. Je me garderais bien de prendre partie sur ce sujet de grandes polémiques, généralement basées sur des « essais » entachés de lourdes erreurs de principe ou de méthodologie. Dans l'état de la réglementation en 1996, ces ancres ne peuvent de toute façon être utilisées que pour un mouillage alternatif.

Les chaînes doivent être conformes aux caractéristiques définies par la norme ISO 4565.

Le câblot doit être en fibre polyamide trois torons (norme ISO 1140) ou en tout autre matériau offrant des caractéristiques équivalentes.

Dans l'essentiel, les caractéristiques définies dans la réglementation correspondent à un mouillage de gros temps, sauf peut-être pour les voiliers de plus de **10,50** m pour lesquels j'estime que le poids des ancres devrait être remonté d'un point. Ceci apparaît dans le TABLEAU **8-III** où figure également le second mouillage qui, en fait, sera utilisé le plus couramment et maintenu à poste.

Dans les régions où l'on peut être amené à mouiller par l'avant et l'arrière (estuaires par exemple), on prévoira une seconde ancre de même poids.

TABLEAU 8/III

Longueur et poids du navire	Mouillage principal						Second mouillage		
L en mètres, P en kg	Poids de l'ancre kg	Ø de la chaîne mm	Ø du câblot mm	Résistance moy. de l'ancre Ra daN	Résistance du nylon mouillé Rn daN	Coefficient de sécurité Rn/Ra	Poids de l'ancre kg	Ø de la chaîne mm	Ø du câblot mm
Dériveurs	Grappin	—	6	—	550	—	—	—	—
Pour L < 5	4-5	6	10	200	1 500	7,5	—	—	—
Pour L < 6,50 ou P < 1 000	8	6	10	350	1 500	4,3	4-5	5	8
entre L ≥ 6,50 ou P ≥ 1 000 et L < 7,50 ou P < 1 000	10	8	14	450	3 100	6,9	6-7	6	10
entre L ≥ 7,50 ou P ≥ 2 000 et L < 9,00 ou P < 3 000	12	8	14	500	3 100	6,2	8	6	10
entre L ≥ 9,00 ou P ≥ 3 000 et L < 10,50 ou P < 4 500	14	8	14	600	3 100	4,8	10	8	14
entre L ≥ 10,50 ou P ≥ 4 500 et L < 12,50 ou P < 8 000	16 20*	10	18	650	5 000	7,7	14	8	14
entre L ≥ 12,50 ou P ≥ 8 000 et L < 16,00 ou P < 12 000	20 24	10	18	800	5 000	6,3	16	10	16
entre L ≥ 16,00 ou P ≥ 12 000 et L < 18,00 ou P < 16 000	24 34	12	22	1 000	7 000	7	20	10	18
entre L ≥ 18,00 ou P ≥ 16 000 et L < 20,00 ou P < 20 000	34 40	12	22	1 400	7 000	5	24	12	20
entre L ≥ 20,00 ou P ≥ 20 000 et L < 25,00 ou P < 30 000	40 60	14	24	2 000	9 000	4,5	34	12	22
L < 25,00 et P ≥ 30 000	60 -	16	28	2 400	12 000	5	40	14	24

Arrêté du 27 décembre 1984

* Les chiffres de gauche sont ceux de la réglementation, ceux de droite les poids conseillés.

TABLEAU 8/IV
AUSSIÈRES D'UN VOILIER

Qté	Désignation	Matière	Longueur	Résistance	Utilisation
1	Ligne légère	Polyester ou polypropylène tressé	4 L	0,25 D	Tous usages, prolongement mouillage léger
1	Remorque	Polyamide toronné	3 à 4 L	0,5 D	Remorquage, prolongement mouillage usuel
2	Aussière lourde	Polyamide toronné ou tressé	1,5 à 2 L	0,5 D	Amarres de pointes
2	Amarre lourde	Polyester ou polypropylène tressé	1,5 L	0,5 D	Gardes
2	Aussière moyenne	Polyamide tressé	L	0,4 D	Traversiers

L = Longueur de la coque
D = déplacement en charge
Tous les cordages devront avoir un emplacement désigné dans un des coffres de cockpit.

Un troisième mouillage sera prévu pour les voiliers de plus de **9** m, destiné à être utilisé par petit temps, lors d'une régate, par calme plat, ou pour s'ancrer à l'heure du bain si l'on est sûr du temps. Le poids de l'ancre sera compris entre la moitié (pour les plus petits) et le tiers (pour les plus gros) du poids de celle du mouillage principal.

Par exemple, pour un voilier de **11** m et de **7,5** t de déplacement, le mouillage principal (de gros temps) comportera une ancre de **20** kg, le mouillage secondaire (usuel) de **14** kg et le mouillage léger de **7** kg. La ligne de ce dernier comportera une longueur de chaîne de **8** m et un câblot de diamètres correspondant au poids de l'ancre.

On sait aujourd'hui que la tenue d'une ligne de mouillage textile est très supérieure à celle de la chaîne, surtout dans les fonds de faible profondeur (3); une absorption d'énergie plus importante et un meilleur amortissement ayant, de plus, un effet favorable sur la tenue du sol dans lequel l'ancre est crochée. Si pour une question de rayon d'évitage, on doit réduire le rapport longueur de ligne/profondeur, il sera toujours préférable d'augmenter le poids de la chaîne ou de placer un lest à sa liaison avec le câblot. Il ne faudra donc pas avoir peur de prévoir une chaîne plus lourde que celle du tableau, en revanche, la longueur prévue est prohibitive pour les grandes unités. Un minimum de chaîne est cependant indispensable au départ de l'ancre car le câblot ne résisterait pas au ragage sur un fond de roches.

Pour le câblot, on préférera au cordage à trois torons un cordage à âme polyamide câblée sous gaine en polypropylène tressé. Ces cordages sont plus souples, évitant les coques, plus élastiques et résistent mieux au ragage. La longueur totale de la ligne sera égale à dix fois celle des fonds fréquentés jusqu'à **10** m environ, se réduisant progressivement jusqu'à **4** fois pour des fonds de **100** m et plus.

Il est d'usage de ranger le mouillage dans une baille située à l'avant de la coque. Malgré le fait que le poids en soit particulièrement mal placé, il faut reconnaître que cette disposition est commode... à condition que le panneau ouvrant ne dégage pas la totalité de la pointe avant du pont. On n'y rangera que le mouillage usuel, l'ancre étant fixée dans un support, contre la cloison arrière, la chaîne dans le fond de la baille et le câblot enroulé sur un tambour auquel il sera fixé par une étalingure.

Le fond de la baille sera en pointe de sorte que la chaîne y soit calée et ne puisse se déplacer sous les mouvements de la coque. Elle sera munie d'un trou de vidange protégé par une grille à l'intérieur et fermée par un panneau verrouillé.

À partir d'une dizaine de mètres, le guindeau pourra être placé dans la baille pour dégager le pont, mais on veillera à ce que la course de la bringuebale ne soit pas entravée et que le trajet entre la poupée et le rouleau du davier soit direct.

On rangera également dans la baille le câblot du mouillage de gros temps.

En revanche, l'ancre et sa chaîne maillée pourront être placées à un endroit plus favorable à condition d'être immédiatement accessibles, sous le plancher au pied de la descente, par exemple. Le mouillage léger, dans son entier, pourra être stocké dans un coffre de cockpit avec néanmoins un support pour l'ancre et un enrouleur sur un support mobile pour le câblot ; la chaîne pourra être rangée dans une poche en toile.

2 LES AUSSIÈRES

Pour pouvoir faire face à toutes les situations, un voilier de croisière doit être équipé d'un minimum de cordages de différentes dimensions et matières adaptées à leur fonction.

Le TABLEAU **8-IV** ci-contre représente l'inventaire minimum d'un voilier de croisière hauturière. On y ajoutera une ligne de touline et divers petits cordages, saisines, rabans, etc.

Pour les petites unités, on sera conduit, pour la commodité de manœuvre, à adopter des diamètres de cordages plus forts que ceux correspondant aux résistances calculées.

On trouvera dans *Voiles et Gréements* (4) les caractéristiques et les poids de tous les cordages.

3 LES PARE-BATTAGE

Selon sa taille, un voilier de croisière devra être équipé de 6 ou 8 pare-battage cylindriques de **30** à **50** cm de diamètre avec amarrage à une ou deux extrémités.Ces accessoires encombrants trouveront place dans le coffre arrière. Il est bon de prévoir également une planche de sapin de **3** m x **0,25** m percée d'un trou à chaque coin, pour protéger les pare-battage des quais trop sales ou rugueux ou munis de défenses en bois. ⚓

BIBLIOGRAPHIE - CHAPITRE 8 •••

1 • H. et V. THÉRON
Électronique, électricité à bord. Hors série n°21.
Loisirs Nautiques - Edition réactualisée,
à paraître.

2 • P. RAPIN
Formulaire du froid. Technique et vulgarisation.

3 • M. KENN
The science of anchoring.
Yachting World, octobre 1974.

4 • P. GUTELLE
Voiles et Gréements.
EMOM. Épuisé.
Loisirs Nautiques - Edition réactualisée,
à paraître.

9

ACCASTILLAGE

DÉSIGNANT autrefois la partie émergée d'une coque, plus simplement ses roufs, timonerie, descentes, portes, etc., en bois, le terme « petit accastillage » étant réservé aux taquets, poulies... placés sur le pont, ce mot n'est plus, de nos jours, utilisé que dans ce dernier sens. Il couvre toutes les pièces employées pour assurer le fonctionnement du voilier, hisser et orienter les voiles, s'amarrer, s'ancrer, protéger l'équipage, etc. C'est à travers ces fonctions que nous allons l'étudier.

A ▪ SÉCURITÉ DE L'ÉQUIPAGE ❁❁❁❁

L'homme à la mer est un des accidents les plus dramatiques et représente un pourcentage élevé dans les statistiques. Encore celles-ci ne font-elles ressortir que les accidents recensés ou ayant connu une fin tragique et l'on ignore tous ceux qui ne se sont soldés que par un bain ou les incidents sans suite qui ne se sont traduits que par une peur rétrospective.

Malgré les reproches systématiques de certains, la réglementation appliquée en France s'est révélée efficace et lorsque, dans les salons étrangers, on étudie l'équipement de certains bateaux, on doit constater que les constructions françaises évitent au moins les plus grossières erreurs.

Néanmoins, cette réglementation ne doit être considérée que comme un minimum qui demandera souvent à être complété.

1 ▪ BALCONS ET FILIÈRES

Ici, encore, une norme ISO 15085 est en préparation. En attendant, la réglementation française actuelle teste la base.

La réglementation définit les caractéristiques géométriques et mécaniques de ces protections.

Selon les catégories de conception, les voiliers doivent être équipés d'une filière à au moins **0,45** m du pont ou de deux filières, la première à **0,30** m au plus au-dessus du pont et la seconde à au moins **0,60** m. Cette protection et les balcons qui lui sont généralement associés doit être continue sur tout le pourtour du pont. Elle est complétée par un calepied d'au moins **30** mm de haut.

La plupart des balcons et chandeliers sont réalisés en tube d'acier inoxydable de **23** x **20** pour ceux de **0,45** m et **25** x **22** pour ceux de **0,60** m, parfois **28** x **25** pour les plus grands voiliers. Ces sections sont faibles puisqu'elles correspondent, pour un acier à **20** daN/mm² de limite élastique, à un effort de **21** daN sur l'extrémité d'un chandelier de **0,60** m et de **23** daN sur un de **0,45** m. Si l'effort est dirigé vers l'extérieur, il est repris par la traction des filières qui, en plan, forment toujours un angle à chaque chandelier, mais s'il est dirigé vers l'intérieur le chandelier seul l'encaisse, c'est pourquoi, lors de mises à couple, on retrouve si souvent des chandeliers tordus. Néanmoins, il est préférable que le chandelier se torde plutôt que de voir l'embase arracher le pont. D'autre part, au moins dans ce sens, la flexion du chandelier

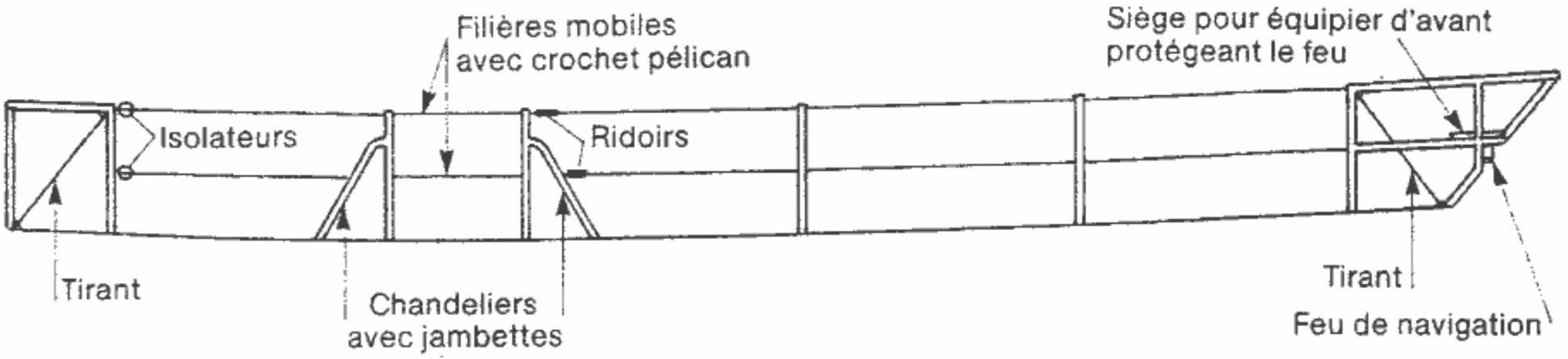


Fig. 9-1 • Disposition des balcons et filières sur un voilier de 11 m. Noter les tirants dans les balcons, le petit siège dans le balcon avant sous lequel est fixé le feu tricolore et le tronçon de filières mobiles avec ses chandeliers à jambettes. (Les longueurs sont 1,5 fois plus courtes que les hauteurs pour la clarté du dessin).

amortira le choc d'un équipier passant par-dessus bord, surtout si son harnais était croché sur la filière.

Les balcons et chandeliers en alliage léger seraient beaucoup plus intéressants comme rapport résistance/poids. Malheureusement, leur prix est très élevé en raison du polissage manuel nécessaire après soudure.

On préférera les chandeliers rétreints pour leur légèreté et leur esthétique et on s'assurera que les passages de filières soient garnis d'un tube largement évasé à ses extrémités pour ne pas couper la gaine de celles-ci. Au sommet, on veillera à ce que l'embout du chandelier ne dépasse pas de plus de quelques millimètres le dessus de la filière. Un embout plus proéminent serait très dangereux, en cas de chute. L'embase du chandelier en acier inoxydable sera en bronze ou en acier, on évitera l'alliage léger sauf, à la rigueur, s'il est fortement anodisé et soigneusement isolé, car la corrosion interviendra toujours à plus ou moins longue échéance, entraînant une fissuration de l'embase. Celle-ci devra toujours être munie d'un petit trou de vidange pour éviter que de l'eau ne stagne à l'intérieur. Elle sera boulonnée sur un renfort solide. En effet, elle devra supporter un moment égal à celui qu'exerce le chandelier au moment où il se plie soit environ **12,5** mdaN pour le tube de **25** x **22** et **0,60** m de hauteur.

Sur une coque métallique, balcons et chandeliers ne seront jamais soudés au pont, de façon à rester démontables.

Sur les coques en plastique, les rails de fargues en alliage léger offrent une excellente fixation pour les embases des chandeliers. L'embase étant généralement en fonderie d'alliage léger, elle sera isolée du tube en acier inox par une garniture de néoprène ou de polyacétal. On évitera, par contre, les embases noyées dans le pont qui furent à la mode à une certaine époque et qui, en ne permettant pas l'évacuation de l'eau, laissent macérer le pied du chandelier.

Lorsque le bateau est équipé d'un pavois, la fixation se fera à la fois sur le pavois et le pont qui se renforceront ainsi l'un l'autre.

Les filières elles-mêmes et leurs fixations doivent résister à une traction de **1 100** daN. Ceci implique une triangulation des balcons pour résister à cette traction (FIGURE **9-1**).

On utilise pour les filières du câble gainé afin d'éviter au maximum les « gendarmes » et l'accrochage des cheveux. Leur circuit ne doit pas assurer la continuité électrique sur le pourtour du pont car ceci perturberait la réception des goniomètres et toute mesure deviendrait impossible. On placera donc des isolateurs à l'une des extrémités, mais non des ligatures comme on le voit trop souvent — dont l'état et la résistance sont invérifiables.

Pour faciliter l'accès à bord, pour le bain, ou pour récupérer un équipier, il est indispensable de prévoir, dans les filières, une section mobile.

Celle-ci est réalisée à l'aide d'un crochet pélican qui permet un décrochage et une retension rapide de la filière. Les chandeliers, situés de part et d'autre de la section mobile, doivent être munis de jambettes pour résister à la traction du reste de la filière lorsqu'elle est ouverte.

On peut prévoir également des sections mobiles dans le balcon arrière pour une planche de coupée. Ce passage peut être mis à profit pour intégrer dans le balcon une échelle de bain rabattable, cette disposition étant surtout valable pour les arrières à tableau inversé ou droit. Pour les autres, on pourra adopter une autre solution qui a l'avantage de placer l'échelle à l'endroit où les mouvements de tangage sont le moins sensibles, où l'on n'est pas gêné par le gréement et sur le chemin de la bôme que l'on peut alors utiliser comme mât de charge. Elle consiste à intégrer dans la filière une échelle rabattable vers l'extérieur et dont la charnière est orientée selon un angle d'environ **45°**, de façon à se retrouver en position verticale une fois rabattue (FIGURE **9-2**). L'ouverture ainsi dégagée sera située à hauteur du cockpit et la longueur de l'échelle devra être telle qu'elle descende au moins à **50** cm sous la flottaison. Elle peut être constituée de deux éléments repliables lorsque le franc-bord est élevé. Un solide verrou à crochet la maintiendra en position relevée pour garantir la

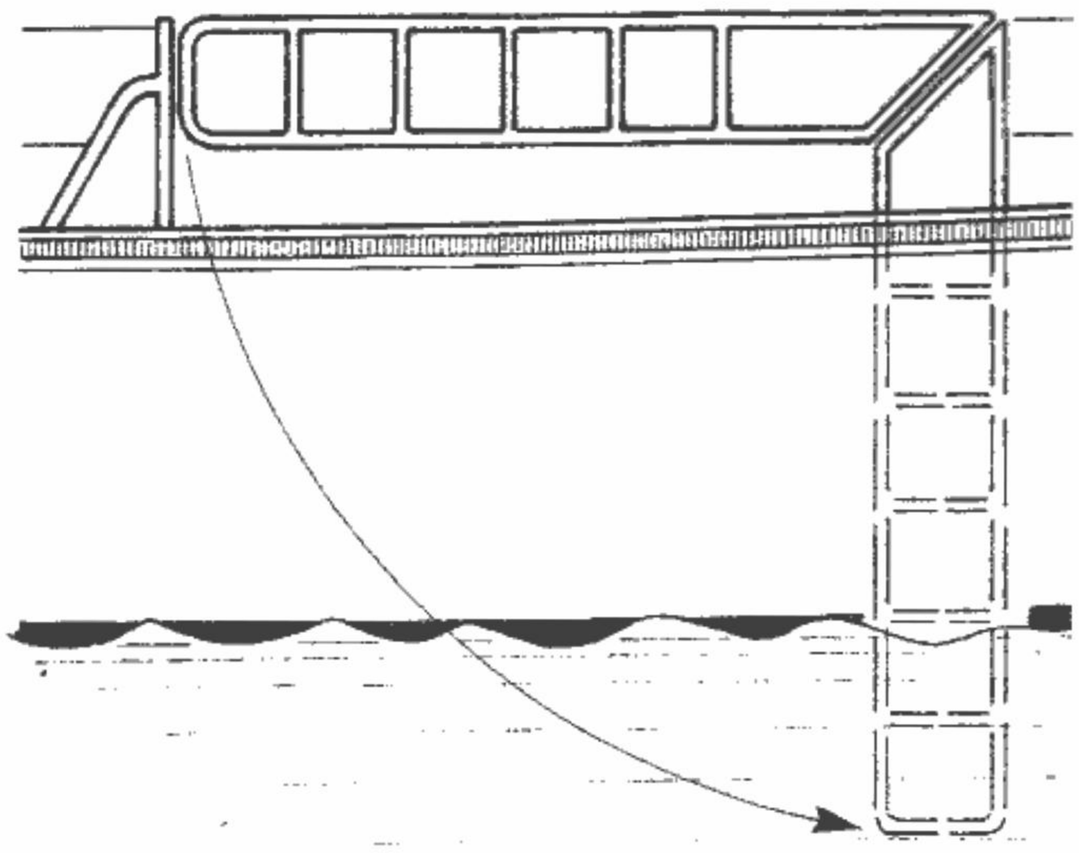


Fig. 9-2 • Échelle de coupée rabattable intégrée dans les filières.

continuité de la filière, et le chandelier placé à l'opposé de la charnière sera muni d'une jambette.

Les balcons seront équipés d'un certain nombre d'accessoires : supports de bouées de sauvetage et de feux, pontets pour les drisses de spinnakers, supports de feux de route, etc. Il faudra veiller à ce que ceux-ci ne soient agressifs ni pour les personnes ni pour les voiles et que *a contrario*, ils ne puissent être endommagés par des cordages qui s'y accrocheraient ou lors de manœuvres d'accostage.

Le cale-pied est également un élément important de sécurité car il est très facile de glisser involontairement sous une filière de **30** cm, et encore plus de **45** cm. Une hauteur de **30** mm est un strict minimum et l'on notera que les rails de fargues en alliage léger ont une hauteur sur le pont d'au moins **45** mm.

Sur un voilier de croisière, un pavois d'une dizaine de centimètres minimum offrira bien des avantages. Sa réalisation ne pose aucun problème en construction métallique, contreplaqué ou bois moulé. Il faudra prévoir de larges dalots au ras du pont, surtout dans le troisième quart de la longueur, là où le franc-bord est minimum.

L'antidérapant du pont est un problème souvent difficile à résoudre. Faute d'un pont en lattes de teck qui semble rester la solution la plus sûre, les revêtements en caoutchouc à gros relief sont efficaces mais agressifs pour les peaux sensibles. On pourra leur préférer les revêtements granités en polyuréthanne, dérivés des produits utilisés sur les stades, qui existent également sous forme de peinture.

Une ligne de vie sera placée de chaque bord le long du rouf depuis l'arrière du cockpit jusqu'au milieu du pontage avant. On peut également la placer sur le rouf le long des mains courantes.

Des points d'accrochage spécifiques seront placés au pied du barreur, au pied du mât, sur la plage avant... Ils doivent pouvoir supporter une traction transversale de **1 100** daN et pour que la ligne de vie n'induise pas une traction longitudinale trop élevée, il est indispensable qu'elle ne soit pas tendue. En effet, avec une charge centrée, pour un supplément de longueur de **1%**, on constate que la traction est de **3 918** daN. Avec **2%**, elle tombe à **2 791** daN et avec **4%** à **2 002** daN. Mais, à ce moment, la flèche atteint **14,5%** de la longueur ce qui pour une ligne de **6** m, donnerait **0,87** m, bien plus que la largeur du passavant.

Pour réduire cette flèche, le mieux est de diviser la ligne en plusieurs tronçons. Un bon compromis semble consister à adopter des tronçons de **3** m avec une surlongueur de **3%** pour chacun ce qui donnerait une flèche de **0,38** m et une traction de **2 296** daN permettant d'utiliser un câble gainé de **6,4** d'une résistance de **2 750** daN.

Deux tronçons adjacents peuvent être fixés sur le même œil à condition que la résistance de celui-ci soit au moins égale à celle du câble, dans toutes les directions.

Pour éviter que la ligne ne se promène en zigzag sur le pont, ce qui risque toujours de provoquer des chutes, on y fixera un sandow ou une bosse cassante entraînant la boucle du surplus dans un endroit moins gênant (FIGURE **9-3**).

2 EMPLACEMENT DU RADEAU DE SAUVETAGE

La réglementation, si elle demande qu'il soit prévu, n'impose pas un emplacement particulier pour le radeau ni un mode de fixation. Étant entendu que l'emplacement doit être accessible de l'extérieur, toute la difficulté du choix réside dans l'encombrement, le poids et le fait que les fabricants n'ont toujours pas réussi à se mettre d'accord sur une norme d'encombrement des conteneurs. Les trois familles d'emplacements généralement utilisées présentent toutes des avantages et des inconvénients, aucune n'est totalement satisfaisante et le choix dépendra en fin de compte de la disposition générale du pont et des emménagements.

A l'origine, le radeau était le plus souvent amarré sur le rouf ou son avant. Proie facile pour les voleurs, mais d'une mise à l'eau aisée, sauf au passage par-dessus les filières, il peut être d'un accès plus difficile s'il est trop sur l'avant. D'autre part, son poids se trouve à hauteur, son fardage, sur le rouf, est important et il n'est pas protégé.

Dans un coffre du cockpit, il est à l'abri, placé au plus bas, accessible de la partie la mieux protégée du bateau, malheureusement son poids le rend difficile à extraire du coffre et on retrouve le même obstacle des filières, que précédemment.

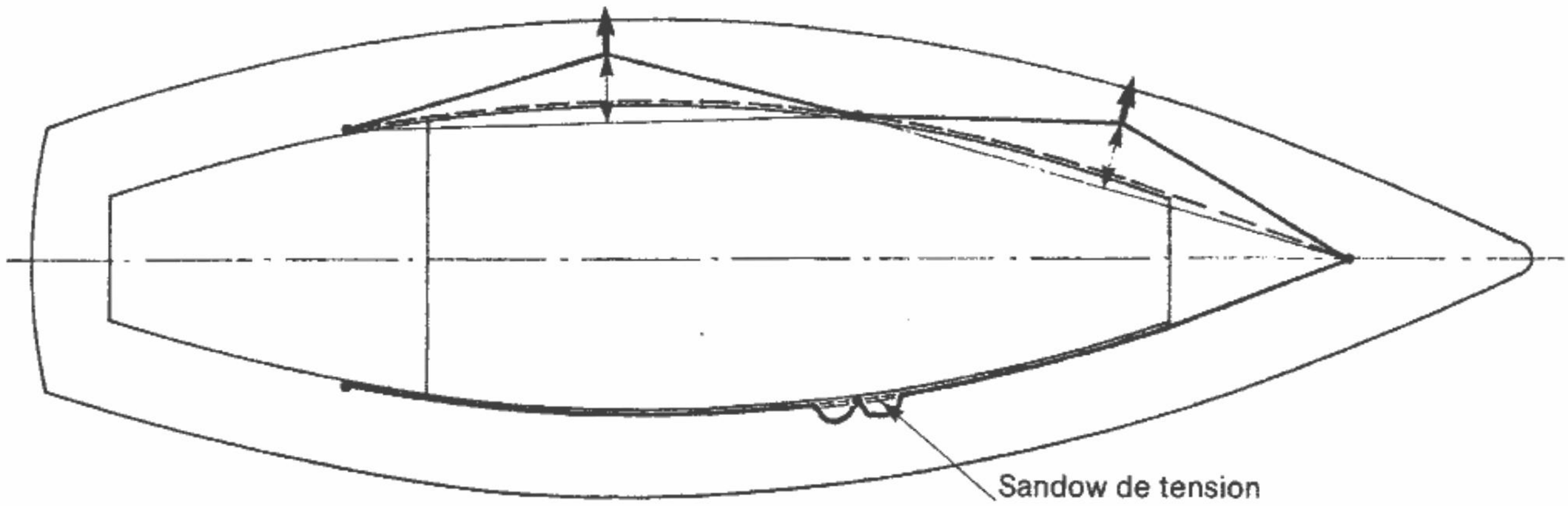


Fig. 9-3 • La longueur des lignes de vie doit permettre d'obtenir un rapport flèche/longueur aussi élevé que possible sous l'effet d'une traction exercée au milieu. Un piton intermédiaire placé à hauteur des haubans permet de réduire la flèche et d'éviter que le câble vienne porter sur les haubans. Un sandow ou une bosse cassante frappés sur les deux éléments de la ligne permettent d'en reprendre le mou pour éviter qu'elle serpente sur le passavant.

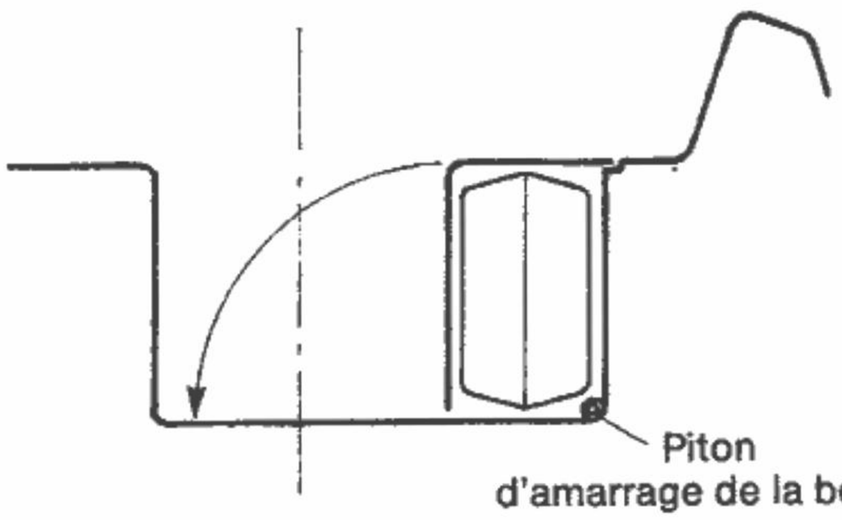


Fig. 9-4 • Un excellent moyen de stockage pour un conteneur de radeau de sauvetage consiste à le fixer à l'intérieur d'un abattant intégré au cockpit.

On peut grandement améliorer cette situation en le plaçant dans un coffre de cockpit étanche par rapport aux emménagements, et en le fixant sur une trappe rabattable (FIGURE **9-4**). Par ailleurs, si les filières sont équipées d'une section mobile à hauteur du cockpit, le problème de leur passage sera largement facilité. C'est, personnellement, la solution que je préfère.

La dernière, couramment adoptée aujourd'hui, est celle du logement dans le tableau arrière avec ou sans trappe de largage. La mise à l'eau est des plus faciles, le poids est bas mais, malheureusement, tout à fait à l'arrière et l'embarquement n'est pas aisé.

Dans tous les cas, un très solide piton sera fixé à l'emplacement du radeau pour y frapper en permanence la ligne d'amarrage. Il est trop facile en effet, dans la précipitation, d'oublier de crocher celle-ci.

Le seul emballage vraiment efficace pour la conservation du radeau étant le conteneur rigide, sa fixation sur son bâti se fera par des sangles à décrochage rapide et en aucun cas par des cordages noués.

B ▪ AMARRAGE ET ANCRAGE ❋❋❋❋

Lorsque l'on observe les voiliers amarrés dans un port, il est incroyable de voir à quel point leur équipement est insuffisant, tant en nombre qu'en qualité.

Pour permettre l'amarrage correct d'un bateau, il est indispensable de disposer d'au moins trois ensembles taquet chaumard de chaque bord, plus un taquet avant et arrière pour les traversiers (FIGURE **9-5**).

Il existe pour les taquets une norme française NF J 33-613 définissant, en fonction du diamètre du cordage, la longueur, la fixation et la résistance.

Elle pourra servir de base pour le choix de sa dimension, même si malheureusement elle n'est pas très suivie par les fabricants.

TABLEAU 9/I

LONGUEUR DES TAQUETS D'AMARRAGE

Ø cordage	**8**	10-**12**	14-**16**	18-20	22-24
longueur	**110**	**170**	**260**	330	450

Nota : Les cotes en gras correspondent à la norme NF J 33-613.

Les taquets d'amarrage avant et arrière doivent pouvoir être utilisés pour le remorquage; ils seront donc choisis en fonction du plus gros cordage présent à bord.

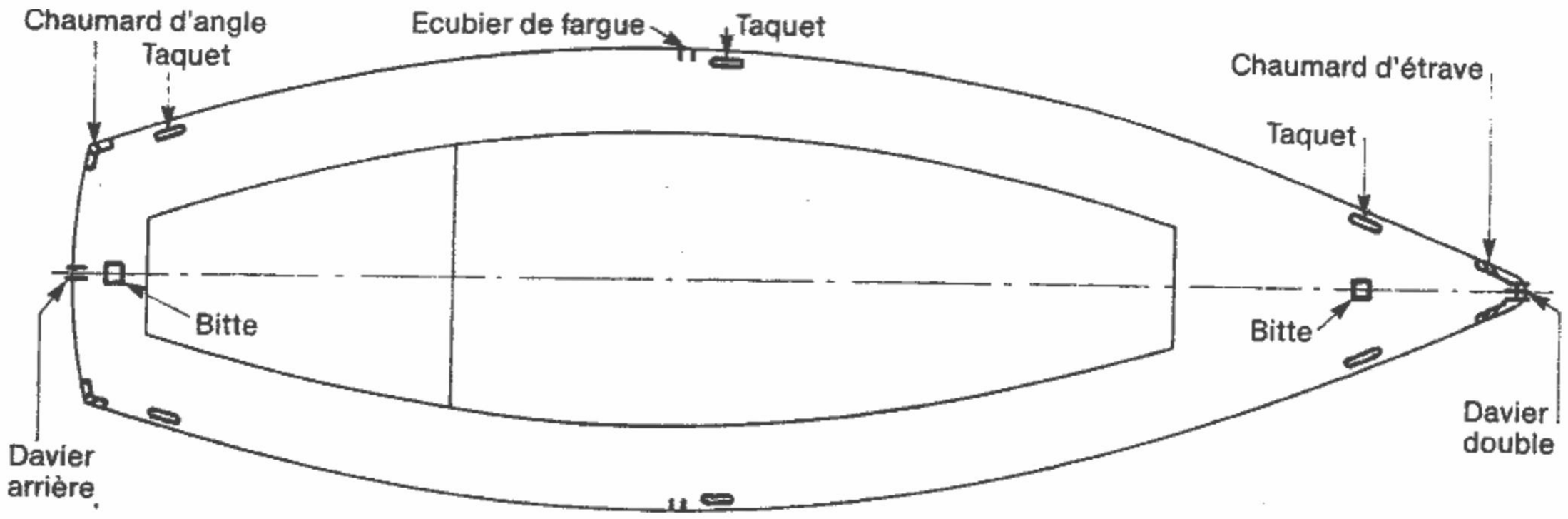


Fig. 9-5 • Équipement minimum pour un voilier de 11 m offrant toutes les possibilités d'amarrage et de mouillage avec un matériel spécifique pour chaque fonction.

La bitte d'amarrage est sans aucun doute le meilleur équipement pour cet usage. Elle s'intègre parfaitement aux coques métalliques ou en bois, plus difficilement aux coques en stratifié (difficultés d'étanchéité). Une bitte peut remplacer deux taquets, mais néanmoins, à l'arrière, il sera préférable d'en prévoir une à chaque coin du tableau pour éviter des circuits d'amarre gênants.

Les taquets d'amarrage, s'ils sont fixés sur le pont, devront être placés en un point où leur fixation pourra être reprise sur la structure de la coque. Il ne faut pas oublier en effet qu'un mauvais calcul de marnage peut laisser le bateau suspendu à ses amarres ! Rappelons que le cordage venant s'amarrer sur un taquet doit toujours être situé dans le plan de fixation de celui-ci et faire avec son axe un angle de 10 à 15° pour ne pas gêner le premier tour.

Si le pont est ceinturé d'un pavois assez haut, celui-ci représente le meilleur point de fixation pour les taquets.

Une garde mobile (FIGURE 9-6) empêchera les écoutes de se prendre dans les taquets lorsqu'ils ne sont pas utilisés. On peut placer également deux sabots en bois s'engageant sous les ailes et reliés par un sandow.

Les chaumards sont également toujours trop souvent négligés. Ils doivent être dimensionnés pour le plus gros des cordages qu'ils peuvent recevoir, y compris la fourrure de celui-ci. On veillera surtout à ce que leur pourtour intérieur soit parfaitement arrondi, surtout pour les chaumards croisés, et l'on n'oubliera pas qu'ils peuvent être soumis à des tractions verticales importantes. Leur fixation devra en tenir compte.

Il existe une norme NF J 37-292 pour les cotes d'interchangeabilité des chaumards.

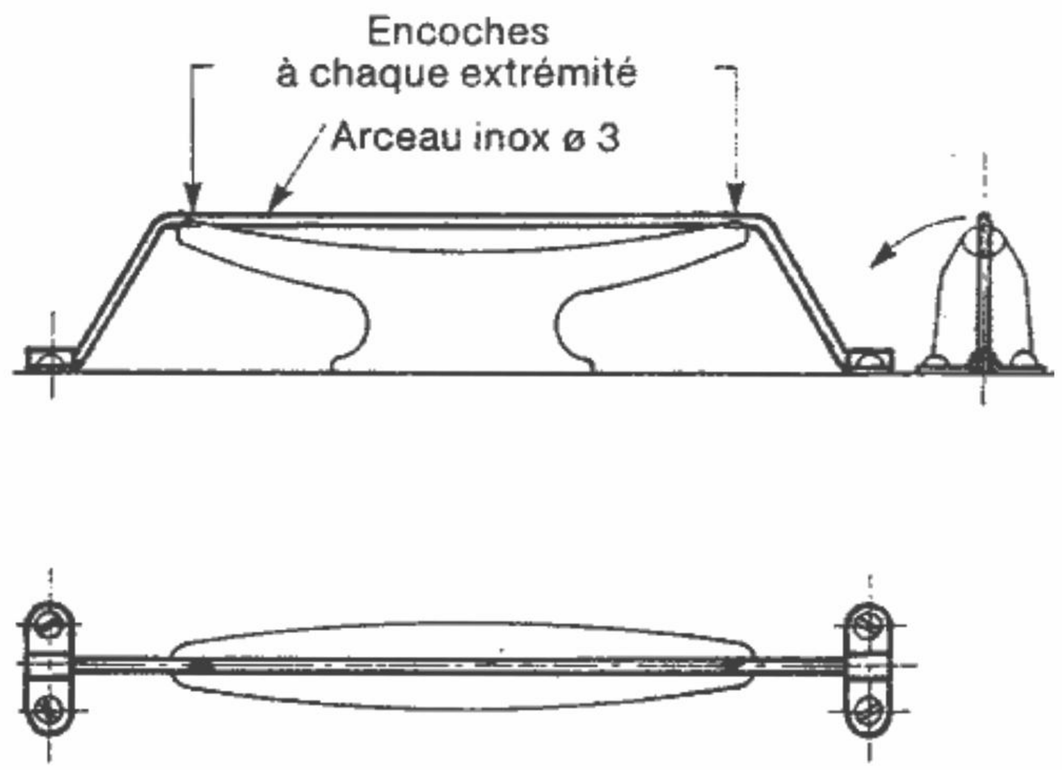


Fig. 9-6 • Garde de taquet.

Sauf à la rigueur pour des petits voiliers, on évitera les chaumards constitués de deux crochets en fil rond soudés. Si la tenue du cordage est généralement bonne, leur diamètre trop faible et le bord de la platine sur laquelle ils sont soudés sont trop agressifs pour les cordages.

Lorsqu'un chaumard ne peut être placé immédiatement à l'aplomb du bordé, il faudra prévoir un jonc d'inox sur les angles des pièces où les cordages peuvent raguer.

Sur un pavois, on montera des chaumards encastrés ou mieux des écubiers de fargues qui ont le gros avantage, au prix d'une petite difficulté de manœuvre, d'assurer une tenue et une protection parfaites des cordages dans toutes les

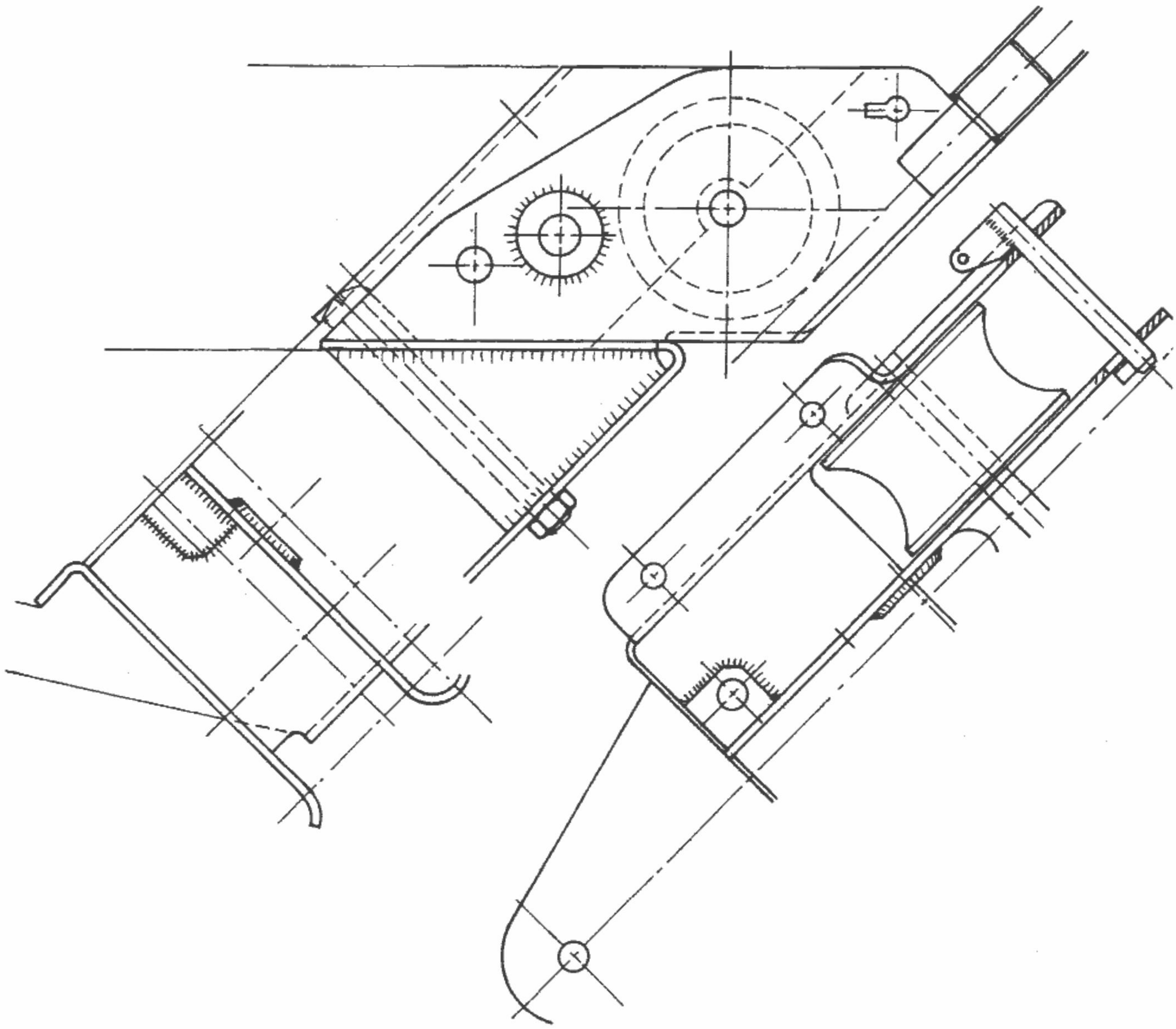


Fig. 9-7 • Exemple de ferrure d'étrave avec double davier pour un voilier de 11 m en bois moulé.

directions, évitant au taquet de se retrouver soumis à des efforts de direction anormale.

Le davier d'étrave est un élément extrêmement important de l'équipement du bateau car de son dessin dépendront la bonne tenue et l'usure des cordages utilisés pour le mouillage, l'amarrage et le remorquage, toutes situations dont dépend sa sécurité.

Très souvent, le davier se trouve intégré dans un ensemble comprenant également la fixation de l'étai et du point d'amure des focs et les pieds avant du balcon. Il résulte de ces voisinages des contraintes qui devront être soigneusement évaluées.

Il ne faudra pas, par exemple, que la chaîne vienne frotter sur la tête ou la goupille de l'axe de fixation de l'étai, sous peine de risquer de voir celles-ci usées prématurément ou cisaillées sans que l'on s'en rende compte. Il ne faut pas non plus que, sous certains angles, les amarres viennent porter sur les pieds du balcon, au risque de les tordre.

D'autre part, cet ensemble, situé tout à l'avant, doit rester aussi léger que possible, tout en conservant dans sa structure et sa fixation une résistance en rapport avec les efforts qu'elle doit supporter. Sur des voiliers jusqu'à une huitaine de mètres, un davier simple peut suffire, au-delà on en prévoira un de chaque bord.

Il n'est pas possible de donner un modèle type car les conditions d'implantation conduisent à des solutions extrêmement variées et la FIGURE 9-7 n'est qu'un exemple. On notera cependant que les galets doivent être d'un diamètre

suffisant pour assurer un roulement correct de la chaîne (environ 6 fois le diamètre du fil), assez larges pour laisser la place au fourrage des amarres et assez avancés pour que la chaîne ne vienne pas trop tôt frotter sur l'étrave. Un axe à verrouillage de sécurité doit empêcher la ligne ou l'amarre d'échapper du davier. Lorsqu'on utilise un mouillage en chaîne, cet axe, muni d'un linguet, sert d'arrêt de chaîne. Dans ce cas, le galet doit comporter une gorge de façon à orienter les maillons dans les plans horizontal et vertical. On réservera un galet à cet usage, l'autre restant lisse pour les cordages. Les joues, à la sortie du galet, devront être largement arrondies pour supporter une déviation des cordages d'au moins **60°**. Ne pas oublier qu'un voilier de croisière doit être équipé d'un davier sur le tableau, car il peut être amené à mouiller par l'arrière.

C ▪ MANŒUVRES

Le circuit des cordages utilisés pour la manœuvre des voiles passe par un certain nombre de poulies servant de renvoi ou de palans, avant d'aboutir à un dispositif d'arrêt, taquet ou bloqueur, en passant si nécessaire par un organe multiplicateur d'effort, le winch.

Ces circuits devront toujours être le plus courts possible et comporter un minimum de renvois, chacun entraînant des frottements et une perte de rendement, et les réas de renvoi devront toujours être calés avec précision dans le plan des cordages.

1 MANŒUVRES EN PROVENANCE DU MÂT

Ce sont de loin les plus nombreuses et il est devenu courant de les conduire jusqu'à l'arrière du rouf afin qu'elles soient accessibles du cockpit.

Cela n'est pas toujours intéressant pour un voilier de croisière naviguant avec un équipage réduit.

La prise de ris, par exemple, demande la présence d'un équipier au pied du mât. Il est donc préférable que soient à portée de sa main les winches de drisse et de bosses de ris. Par contre, pour les focs, l'équipier d'avant qui récupère la voile descendue et met en place les mousquetons ne peut manœuvrer le winch qui sera mieux situé à portée du barreur.

On pourra également placer devant le cockpit tout ce qui concerne les réglages : hale-bas de bôme, manœuvres de tangon...

Pour ces manœuvres, les taquets coinceurs à mâchoires ont laissé la place aux bloqueurs issus du même principe, mais qui peuvent être commandés par un levier. Le bloqueur idéal ne doit pas avoir une came qui agit directement sur le cordage, mais par l'intermédiaire d'un sabot. Le blocage est moins agressif pour le cordage et ne provoque pas de déplacement de celui-ci lors du serrage, d'où un réglage plus précis. Il doit être adapté au diamètre du cordage et le levier, une fois rabattu, ne doit pas présenter de risque d'accrochage provoquant un largage intempestif et parfois dangereux. Enfin les bords de la cage doivent être parfaitement arrondis, et la fixation en rapport avec la charge à supporter.

Lorsqu'un winch est utilisé pour plusieurs manœuvres, les bloqueurs placés en avant doivent être rapprochés le plus possible et orientés de façon à rester dans l'axe des cordages.

2 ÉCOUTES DE FOCS

La multiplicité des voiles d'avant implique des points de tire variables. Cette condition est réalisée avec un chariot portant un avale-tout et réglable sur un rail. Il reste que cette solution ne permet pas de réglage latéral, sauf à disposer de plusieurs rails ou de dispositifs beaucoup plus complexes qui ne sont admissibles que sur des voiliers de course. Sur un voilier de croisière, on se contentera généralement d'un rail faisant, à partir du point d'amure, un angle de **10** à **15°** avec l'axe.

Pour les génois et les allures portantes, on pourra placer un second rail au sommet du pavois ou des poulies ouvrantes sur un rail de fargue.

Dans tous les cas, il est indispensable de prévoir une poulie fixe de retour pour que l'écoute arrive au winch toujours sous le même angle. Cette poulie devra être calée avec précision et sa fixation particulièrement robuste, car elle supportera un effort double de la traction qui s'exercera dans l'écoute.

Pour faciliter les manœuvres de changement de voile d'avant, on placera deux chariots sur le rail et la poulie de retour sera à double réa.

La fixation du rail devra être particulièrement renforcée aux endroits où se situeront les points de tire des génois lourds et toutes les reprises possibles sur les éléments de structures seront utilisées.

3 ÉCOUTE DE GRAND-VOILE

Toutes sortes de dispositions de palans sont possibles, le winch n'étant vraiment nécessaire que sur des unités dont la grand-voile dépasse **25** m².

Même sur un voilier de croisière, il est important que le palan d'écoute soit monté sur un rail, cela permettra d'obte-

nir un meilleur réglage de la voile, soulagera le hale-bas de bôme et évitera parfois de prendre un ris sur un bord court. Un autre avantage sera de dégager le panneau de descente.

Mais il ne faut pas croire qu'un voilier de croisière pourra se contenter d'un équipement rudimentaire, il vaut mieux ne rien avoir plutôt qu'un chariot qui ne coulisse qu'à coups de pied, et de bons palans de commande avec des taquets d'amarrage sûrs sont d'abord une condition de sécurité. Des butées réglables permettront de soulager ces palans sur les grands bords où l'on n'aura pas à prévoir de modification rapide du réglage.

4 LES WINCHES

Le winch est aujourd'hui un élément de base de tout accastillage. Des regroupements entraînant une sélection se sont effectués parmi les principaux fabricants mondiaux réduisant le choix à trois ou quatre grandes marques dont les gammes se correspondent plus ou moins, avec une qualité sensiblement égale. Le choix va donc s'effectuer en fonction des caractéristiques mécaniques recherchées... et des prix.

La partie la plus lourde du winch est la poupée, c'est pour elle que l'on peut trouver des matériaux différents, alliage léger, bronze chromé, acier inoxydable. Le premier est le plus léger et devrait être le moins cher, mais, même en alliage traité et anodisé dur, il ne peut convenir qu'aux cordages textiles, les câbles métalliques usant la poupée trop rapidement. Néanmoins, ceci ne concerne que les très grosses unités.

On évitera l'anodisation noire, certes très esthétique, mais qui, en concentrant la chaleur, entraîne un vieillissement plus rapide des graisses lubrifiantes. Une petite housse en toile blanche peut réduire cet inconvénient.

Le bronze chromé donne un poids sensiblement égal à l'acier inoxydable et se situe en position intermédiaire pour le prix. C'est le matériau le plus couramment utilisé, l'acier inoxydable étant plutôt réservé aux modèles de gros calibre destinés à recevoir du câble métallique. La solution idéale serait bien sûr le titane qui offre un rapport $\mathbf{R_t/d}$ deux fois et demie plus élevé que l'alliage léger, mais son prix le fait réserver à des unités particulières, quand il n'est pas banni par les règlements de série.

La construction interne des winches utilise essentiellement l'acier inoxydable et le bronze. Compte tenu du nombre de pignons et de roues à cliquets utilisés dans les modèles à démultiplication, le rendement mécanique peut osciller entre 60 et 85 % selon les pertes par frottement. Les éléments jouant sur celles-ci sont la rigidité du fût, la qualité de taille des engrenages et le nombre des roulements, ces deux derniers facteurs intervenant bien sûr sur le prix.

La quasi totalité des winches que l'on trouve actuellement sont entraînés par une manivelle amovible venant s'enclencher sur le dessus de la poupée. Deux longueurs de manivelles sont standard, **203** mm (**8'**) et **254** mm (**10'**). Elles peuvent être fabriquées en matériau composite, alliage léger ou bronze chromé, avec ou sans verrouillage. Il existe également des modèles à cliquets permettant d'orienter rapidement la manivelle dans la position la plus favorable à l'effort.

Deux équipiers sont normalement nécessaires pour manœuvrer un winch, l'un tournant la manivelle, l'autre embraquant le cordage. Après une longue mise au point et bien des déboires, ce problème semble résolu par un système de poulie bloquante (*self tailing*) placée en tête de la poupée.

Ces modèles sont extrêmement intéressants pour la croisière en équipage réduit et se généralisent même en course pour les winches secondaires (autres que ceux d'écoutes de génois ou de spinnaker).

Sur les grosses unités où les tractions à exercer deviennent très élevées, on pourra installer des liaisons mécaniques entre plusieurs winches, de façon à ce que plusieurs équipiers puissent actionner l'ensemble ou, si la place sur le pont le permet, un entraînement par manivelle sur piédestal, le « moulin à café », permettant toutes les combinaisons possibles. Compte tenu de la disposition bien meilleure des manivelles et du fait qu'elles peuvent être actionnées par deux équipiers simultanément, il est possible d'utiliser des tambours de plus grand diamètre que les poupées et des rapports de démultiplication moins, élevés d'où une plus grande rapidité de manœuvre.

Pour des voiliers de croisière, cette solution peut être envisagée à partir d'une quinzaine de mètres.

Si la disposition du pont le permet, il sera souvent plus efficace de disposer d'un seul winch à piédestal manœuvré dans de bonnes conditions que de deux winches simples, mais mal placés.

La caractéristique mécanique principale d'un winch est le rapport de démultiplication de l'effort à exercer. Cette démultiplication peut être obtenue directement par le simple rapport entre les rayons de la manivelle et de la poupée **R/r**. Ainsi un winch direct, avec une poupée de **60** mm de diamètre et une manivelle de **250** mm, aura un rapport de démultiplication de **250/30 = 8,33/1**.

Pour obtenir des démultiplications plus élevées, on devra faire intervenir des trains d'engrenages dont les rapports viendront multiplier d'autant le rapport direct.

Par exemple, si dans le même winch, nous introduisons un train d'engrenages dont le rapport est de **2/1**, le rapport global deviendra **250** x **2/30** = **16,66/1**. On peut ainsi réaliser des winches à deux ou trois vitesses pouvant atteindre des rapports allant jusqu'à **80/1** par le jeu de différents trains

d'engrenages s'embrayant par encliquetage selon le sens de rotation de la manivelle ou par d'autres moyens.

Mais le winch n'entraîne le cordage que par friction de celui-ci sur la poupée. La traction qu'il pourra exercer sera donc fonction de cet entraînement. Deux facteurs interviendront sur celui-ci : le coefficient de frottement entre cordage et poupée et la longueur de cordage en contact avec celle-ci, laquelle sera égale au nombre de tours du cordage, multiplié par la circonférence de la poupée.

De ce dernier point, et toutes choses étant égales par ailleurs, il résulte que pour un rapport de démultiplication donné, plus le diamètre de la poupée sera grand et plus la traction potentielle sera élevée.

L'augmentation du rapport de démultiplication a un corollaire plus désagréable qui est la perte de vitesse. En effet, la vitesse circonférentielle (au niveau de la poignée de la manivelle) est inversement proportionnelle au rapport de démultiplication. C'est-à-dire que si le rapport est de **65/1**, pour enrouler **1** cm d'écoute il faudra décrire **65** cm de circonférence soit **0,4** tour d'une manivelle de **0,25** cm. Comme, à effort sur la manivelle égal, on fera plus facilement le tour avec une manivelle courte, il sera souvent préférable, surtout en croisière, de choisir le rapport de réduction avec celle-ci (attention, le rapport indiqué par le fabricant est presque toujours pour la grande manivelle). Ceci aura l'avantage supplémentaire de disposer, s'il en est besoin, d'une réserve de puissance, simplement en utilisant la manivelle longue.

Les fabricants donnent dans leur documentation des tableaux indiquant la taille du winch à utiliser selon la taille du voilier et la manœuvre. Ces tableaux sont établis en géné-

TABLEAU 9/II

RAPPORT DE RÉDUCTION AVEC GRANDE MANIVELLE DES WINCHES POUR VOILIERS DE COURSE ET DE CROISIÈRE *(caractéristiques en grisé)*

	1/4 ton		1/2 ton		1 ton					
Longueur H.T. m	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18
Déplacement en charge T	2	3,5	5	6,5	8	10	12	14	20	28
Surface génois maxi m²	20	28	35	45	55	65	80	100	135	180
	16	24	32	40	50	60	75	90	120	150
Surface grand-voile m²	12	14	17	21	25	30	35	45	65	100
	10	14	17	20	25	30	35	40	55	70
Écoute de génois	7/8	16/24	30/40	40/46	43/48	46/55	48/65	55/70	65/90	70/100
Écoute de grand-voile	—	6	6/8	7/16	16/24	24/40	30/40	40/46	43/46	46/48
Écoute de spinnaker et drisse de génois	6	7/8	16/24	24/40	30/43	40/46	46/48	48/55	55/65	65/70
Drisse de grand-voile	—	6/7	7/8	16/24	24/40	30/40	30/40	40/43	43/46	46/48
Drisse de spinnaker et de trinquettes	6	7/8	8/16	24/30	30/40	30/40	40/43	43/46	46/48	48/55
Hale-bas de bôme	—	—	6	7	8	16	24	30	40	43
Bordure de G.V.	—	—	—	6	7	7	8	8	8	16
Bosses de ris	—	—	7	8	16	24	30	40	43	46
Balancine de tangon	—	—	—	6	7	8	16	24/30	30/40	40/43
Hale-bas de tangon	—	—	6	7/8	8/16	16/24	24/30	30/40	40/43	43/46
Bastaques	7/8	8/16	16/24	24/30	30/40	40/43	43/46	46	48	55

Nota : Pour les bastaques, le chiffre le plus élevé est applicable aux gréements fractionnés.

ral pour des voiliers de course, mais il serait faux de croire qu'un voilier de croisière peut se contenter d'un calibre inférieur. Tout au contraire, en course, les équipiers sont plus musclés, mieux entraînés et l'on recherche avant tout la vitesse de manœuvre, les rapports de démultiplication sont donc calculés au plus juste et, pour un croiseur, il ne sera pas mauvais de prévoir le modèle au-dessus surtout pour les winches d'écoute de génois.

Dans les tableaux des fabricants, il ne faudra pas tenir compte des surfaces de voiles, un voilier de course étant toujours plus voilé qu'un croiseur, mais du déplacement ou à la rigueur de la longueur. Le TABLEAU **9-II** en est une synthèse.

Dans le doute, pour le winch principal, on pourra toujours considérer que la traction maximum que l'on aura à exercer sera de **30** daN par m² de génois maxi, ce qui correspond environ à l'effort par un vent de force **6** pour un voilier de croisière de déplacement moyen. Sachant que l'effort maximum que peut exercer sur un winch un adulte bien musclé est d'environ **25** daN, on pourra en déduire le rapport de démultiplication maximum nécessaire.

Dans le voilier que nous avons choisi comme exemple pour le calcul du gréement, le génois est de **42** m². Avec une grand-voile à deux ris, on pourra se trouver encore avec un génois lourd de cette surface par force 6. La traction sur l'écoute sera alors de **42** x **30** = **1 260** daN. Le rapport maximum du winch devra être au moins égal à **1 260/25** = **50,4** ce qui correspondra, par exemple, au Lewmar 48 qui sont les modèles conseillés par les fabricants, si l'on tient compte d'un déplacement correspondant au type de voilier de course indiqué (1 ton minimum).

Pour les écoutes du spinnaker, il est généralement prévu des winches de rapport inférieur, l'effort à fournir étant plus faible. En croisière, où le spinnaker n'est utilisé que par beau temps — quand on ne lui préfère pas des trinquettes jumelles — cette différence peut être maintenue, voire accrue. Néanmoins, il peut être intéressant, lorsque l'on n'est pas tenu par le prix et le poids, de monter des modèles identiques afin de disposer toujours en cas de panne de la puissance maximum et de simplifier les problèmes de maintenance et de pièces détachées.

a ▪ Installation des winches

L'emplacement des winches sur le pont doit être étudié pour réaliser les circuits des cordages les plus courts et les plus directs, tout en les plaçant à meilleure portée possible des équipiers.

Il faut éviter également tout croisement de ces circuits et toute obstruction, rouf, hiloires, autre winch... Ceci est surtout critique à tribord où, compte tenu du sens d'enroulement (sens des aiguilles d'une montre), l'écoute de foc passe très près du winch de spinnaker placé plus en arrière (FIGURE **9-8**).

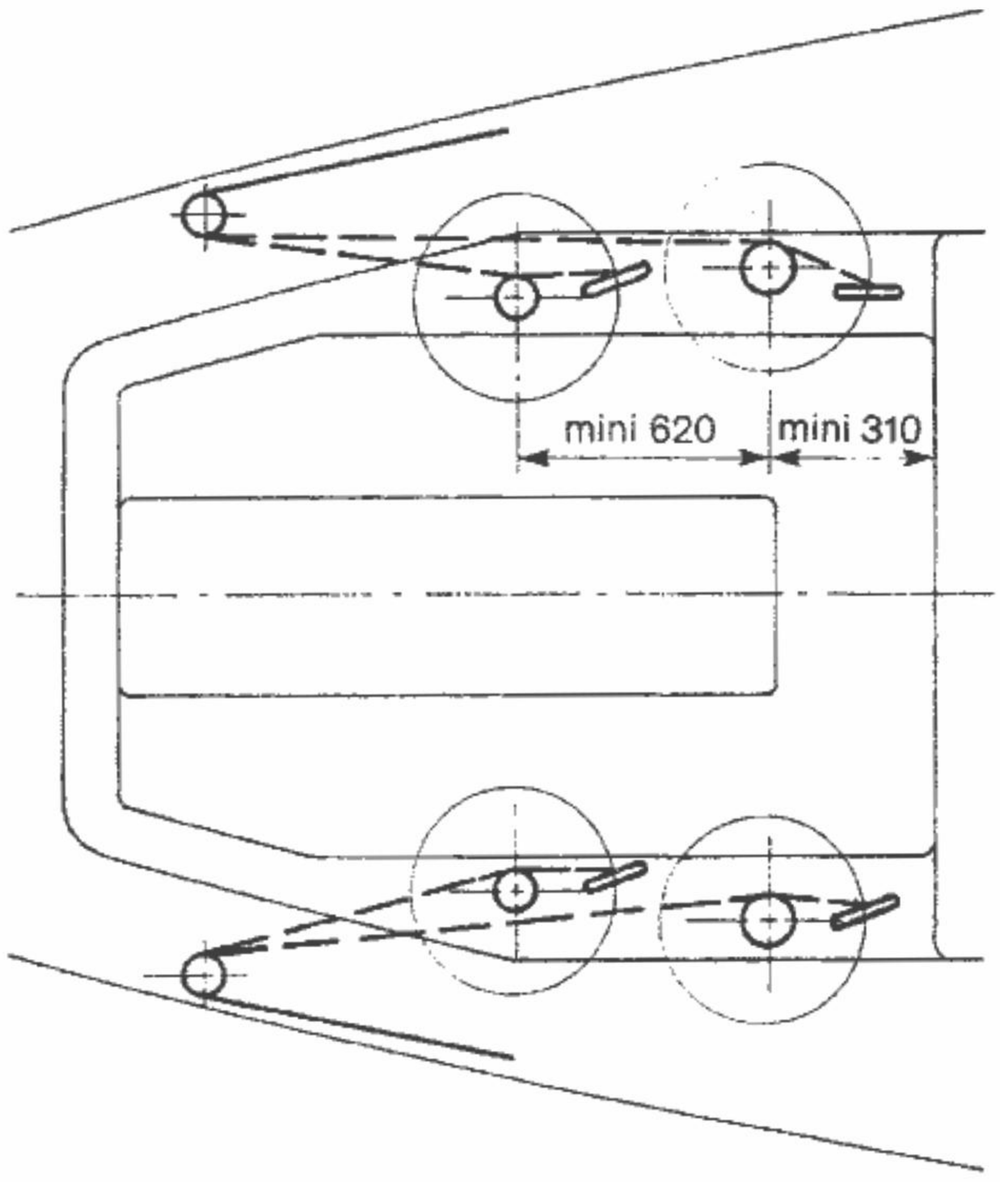


Fig. 9-8 • L'emplacement relatif des différents winches et de leurs taquets dépend de la garde qu'il faut laisser par rapport aux obstacles que l'on peut rencontrer sur le trajet de la manivelle et du circuit des écoutes qui ne doit venir en conflit avec aucune pièce d'accastillage. Ceci est particulièrement délicat à tribord.

D'après des mesures effectuées par un grand fabricant britannique, l'effort maximum est obtenu lorsque la manivelle se situe à une hauteur au-dessus du sol égale à **0,39** de la hauteur de l'individu. Pour un homme de **1,80** m, cela donne **0,70** m. À cette hauteur, le poids du buste en porte-à-faux vient accroître l'effort exercé par les bras.

Malheureusement, cette hauteur idéale est difficile à obtenir pour les winches montés sur les hiloires et pour la manœuvre desquels on est obligé de poser au moins un genou sur le banc.

Dans le cas d'un winch dont l'axe est horizontal (winch de drisse par exemple), l'axe de celui-ci sera placé entre **0,65** et **0,75** m au-dessus du pont.

Aucun obstacle ne doit se présenter sur la trajectoire d'une manivelle de winch dans un rayon supérieur d'au moins **50** mm à la longueur de celle-ci (attention aux filières). Si deux winches placés côte à côte peuvent être manœuvrés en même temps, leur distance ne sera pas inférieure à la somme des longueurs de leur manivelle plus **120** mm, soit **620** mm.

Le cordage qui vient s'enrouler sur la poupée doit faire avec l'axe vertical de celle-ci un angle légèrement supérieur à **90°** pour éviter les chevauchements, mais néanmoins

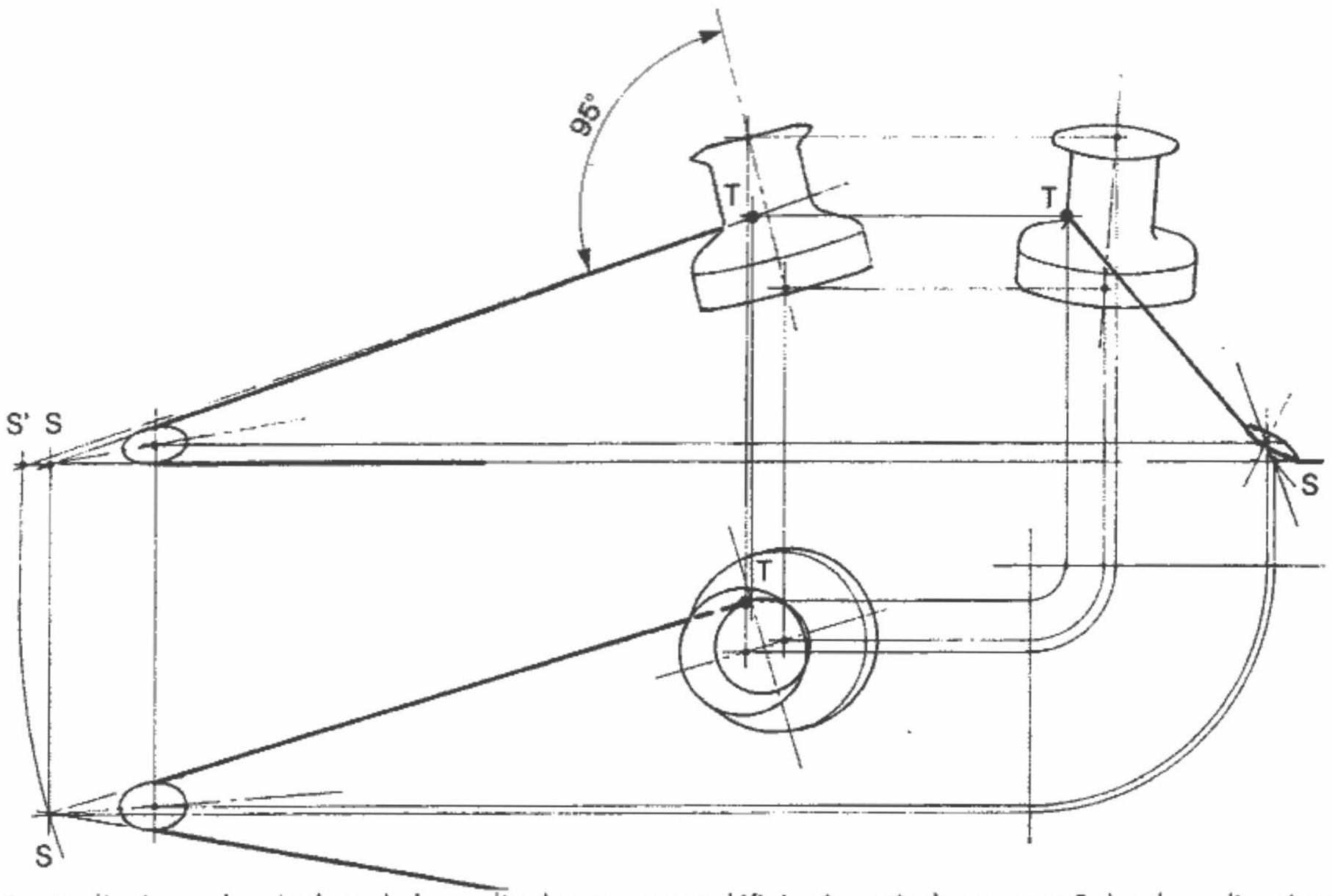


Fig. 9-9 • Les inclinaisons du winch et de la poulie de retour sont définies à partir du sommet **S** des deux directions de l'écoute et du point de tangence **T** de celle-ci avec la poupée du winch. L'angle de l'axe de celui-ci avec l'écoute en vraie grandeur (point **S'**) doit être compris entre 90 et 100°.

pas supérieur à **100°** pour éviter des frottements néfastes sur la base. Les inclinaisons transversales et longitudinales des winches et des réas de renvoi devront être déterminées en tenant compte de cet angle et c'est pourquoi aussi, pour respecter en permanence cette condition, les écoutes de focs et de spinnakers doivent impérativement passer par une poulie de retour fixe (FIGURE **9-9**).

La poulie de renvoi devra être placée aussi près que possible du winch, mais en laissant néanmoins une distance suffisante (de **0,75** m à **1** m) pour pouvoir y frapper une bosse, en cas de chevauchement bloqué sur la poupée.

Il va de soi que les taquets servant à amarrer les écoutes seront placés du côté opposé à celui d'où celles-ci arrivent.

Bien sûr, les parties du pont sur lesquelles sont fixés les winches et surtout les poulies de renvoi (qui supportent un effort double) seront spécialement renforcées.

D ▪ APPAREILS À GOUVERNER ❋ ❋ ❋

Lors de l'établissement des plans de voilure et d'emménagement, il sera très important de contrôler le conflit qui pourrait se produire entre la bôme et le barreur, lorsque celui-ci se tient debout. La bôme sera soit suffisamment haute pour passer au-dessus de la tête, soit suffisamment courte pour ne pas risquer de le frapper au visage en cas d'empannage incontrôlé lors d'une prise de mouillage ou d'un accostage (cela m'est arrivé !). Rien ne remplacera la sensibilité d'une barre franche. Cependant, à partir d'une certaine taille de safran, l'effort nécessaire devient tel qu'il nécessiterait une barre de longueur démesurée. Il est alors nécessaire d'introduire une démultiplication mécanique facilement réalisable avec une barre à roue.

Celle-ci a, de plus, l'avantage de tenir peu de place en longueur, de libérer l'arrière du cockpit et de pouvoir être couplée soit avec une autre barre à roue, soit avec un pilote automatique. Elle peut s'installer normalement à partir d'une dizaine de mètres.

Les systèmes utilisant des câbles coulissant sous gaine, de même que ceux à engrenages et arbre de transmission ou à leviers et bielles sont peu répandus, bien que ces derniers, s'ils sont bien réalisés, assurent une précision supérieure à tous les autres systèmes. Malheureusement, ils sont lourds. Ils sont couverts par la norme ISO 13929.

On s'intéressera donc essentiellement aux appareils à drosses entraînant un secteur à partir d'une chaîne à rouleaux s'enroulant sur un pignon monté sur l'axe de la roue. C'est le système le plus simple, le plus facile à surveiller et qui, s'il est bien monté, génère le moins de frottements. Il doit être conforme à la norme ISO 8847.

Le rapport de réduction entre l'effort exercé sur la jante de la roue et la traction dans la drosse dépend du rapport entre le diamètre de celle-ci et celui du pignon. Les dimensions les plus courantes de roues et de pignons varient entre **50** cm et

1 m et **45** mm et **70** mm, la plage de rapports s'étend donc entre **7** et **20** environ, soit, pour un effort sur la roue de **45** daN, une traction sur la drosse de **315** à **900** daN auxquels il est bon d'ajouter **10 %** pour tenir compte des frottements. Le diamètre du câble correspondant devra être déterminé en prenant ces valeurs comme limite élastique avec un coefficient de sécurité au moins égal à **2**. Rappelons que pour le câble souple inoxydable la limite élastique se situe à environ **70 %** de la résistance à la rupture.

Quant au moment exercé sur la mèche du safran, il sera proportionnel à la traction de la drosse et au rayon du secteur. Celui-ci variant entre **20** cm et **45** cm, le moment exercé, toujours pour un effort de **45** daN sur la roue, variera de **71** à **495** mdaN. Mais attention, ce n'est pas de ce moment que l'on doit tenir compte pour le calcul de la liaison mèche secteur. En effet, la course de ce dernier est limitée par des butées et lorsque celles-ci entrent en jeu sous l'effet des efforts hydrodynamiques extrêmes auxquels le safran peut être soumis, le moment de torsion atteint des valeurs bien plus élevées (VOIR CHAPITRE 4-B-1-m).

Le corollaire du rapport de démultiplication sera le nombre de tours de la roue qui, entre ces extrêmes, passera de moins de **1,5** à **5** tours pour une rotation du safran de **90°** (± **45°** de chaque bord).

En moyenne, on pourra se baser sur les rapports d'angle de rotation entre roue et secteur suivants :

Longueur H.T.	< 10m	10 à 12,5	12,5 à 16	16 à 18	18 à 25
Rapport	7	9 à 11	12 à 14	14 à 18	18 à 22

Quelle que soit la taille du voilier, on aura toujours intérêt, pour un nombre de tours donné, à prendre le secteur, le diamètre du pignon et celui de la roue aussi grands que possible, afin de réduire la traction sur la drosse, ce qui permettra l'utilisation d'un câble de diamètre plus faible, donc plus souple, s'usant moins (à diamètre de réas égal) et donnant une barre plus douce. Les formules suivantes permettent de calculer, directement le moment **M** sur la mèche et le rapport **R** des angles de rotation roue/quadrant :

M = F . D, r/d

R = 2r/d avec :

F = force exercée sur la roue, ~ **45** daN

D = diamètre de la roue

d = diamètre du pignon

r = rayon du quadrant.

Deux types de secteurs sont montés. Le premier couvre un angle de plus de **270°** et peut être attaqué directement par les drosses provenant des réas de renvoi situés à la base du piédestal. C'est le plus direct puisqu'il ne nécessite aucun autre réa de renvoi. Il a l'inconvénient d'exercer sur le palier supérieur de jaumière un effort dirigé toujours dans le même sens, d'où des risques d'ovalisation plus rapide. Par ailleurs, il ne peut se monter que si le plan dans lequel se situe le secteur peut tangenter les réas de sortie, donc si la mèche n'est pas trop inclinée et (ou) trop loin du piédestal.

Pour maintenir la tension des câbles, il peut être bon de prévoir une entretoise reliant un palier situé au-dessus du secteur à la base du piédestal. La butée limitant la course est un doigt venant au contact de taquets fixés à la coque. Inutile d'insister sur la solidité de ceux-ci quand on voit, par le calcul de la mèche, l'effort qu'ils peuvent avoir à encaisser.

Le second type de secteur ne couvre qu'un angle limité à un peu plus de 90°. Les drosses, renvoyées par des réas l'attaquent donc de chaque bord.

L'effort est ainsi réparti alternativement sur les côtés opposés du palier. L'ensemble palier de jaumière et supports des poulies de renvoi doit constituer une structure extrêmement rigide pour équilibrer les compressions qui s'exercent entre eux, ainsi que les efforts des taquets de butée. Il n'est pas interdit de prévoir, de plus, une triangulation avec l'embase du piédestal.

Selon le type de secteur et l'emplacement relatif du piédestal, de la mèche et du secteur, il peut être nécessaire de croiser les câbles pour respecter les sens de rotation. Rappelons que lorsque la roue est tournée dans le sens des aiguilles d'une montre, en regardant vers l'avant, le safran s'oriente vers tribord. On évitera autant que possible ces croisements de drosses, sources d'usure et de parasites radioélectriques, à moins de pouvoir orienter les poulies de sortie pour éviter tout risque de frottement.

Le calage des réas de renvoi doit être rigoureusement dans le plan contenant les parties amont et aval des drosses afin qu'il n'y ait aucun frottement parasite qui pourrait entraîner une usure des câbles, des réas ou du secteur.

Le diamètre intérieur des réas devra être d'au moins **20** fois celui du câble *, et ils doivent être équipés d'une garde l'empêchant d'échapper. Leur résistance devra être au moins égale à **2** fois celle du câble. Les drosses sont attachées sur le secteur par des tendeurs à vis. L'écrou de ces tendeurs doit être bloqué par un contre-écrou et, de plus, une goupille doit être montée en bout de vis de sorte que, si l'écrou venait à se desserrer, il ne puisse s'échapper et libérer la drosse.

Un test, enfin, que Rod STEPHENS appliquait sur tous les voiliers qu'il mettait au point : le bateau étant au mouillage, un moment d'un pied . livre (**0,14** mdaN) doit entraîner la roue sur toute sa course.

* La norme indique 16 fois, mais j'estime qu'il faut prévoir plus pour accroître la longévité des câbles.

Un frein de roue est utile pour bloquer le safran au mouillage ou, en marche, pour exécuter une manœuvre.

Pour l'installation d'un pilote automatique, on remplacera un des réas par le pignon de commande de celui-ci en intercalant un élément de chaîne à rouleau dans la drosse. Pour un entraînement correct, la chaîne doit faire au moins **1/4** de tour sur le pignon.

1 APPAREILS HYDRAULIQUES

Un appareil à gouverner hydraulique comporte essentiellement deux parties : une pompe actionnée par la roue et un vérin à double effet entraînant la mèche par l'intermédiaire d'une biellette. L'intérêt de ce type d'appareil réside principalement dans sa flexibilité d'installation, les deux éléments totalement indépendants n'étant réunis que par deux canalisations souples ou partiellement rigides. D'autre part, il est plus facile de multiplier les postes de commande et d'intégrer un pilote automatique qu'avec un système mécanique.

Pour un voilier, on choisira toujours un appareil réversible, c'est-à-dire dont la roue retransmet à la main du barreur les efforts du safran afin de conserver la sensibilité de barre. Mais celle-ci sera toujours moins bonne qu'avec un système mécanique bien conçu et bien réglé. Enfin, un indicateur d'angle de barre est indispensable, la roue ayant une position par rapport au safran qui n'est pas fixe. Ce système est couvert par la norme ISO 10592.

2 LA BARRE DE SECOURS

Élément extrêmement important pour la sécurité, la barre de secours est presque toujours sacrifiée et nombre d'architectes et de constructeurs mériteraient d'être condamnés à des heures de barre de secours par mauvais temps.

Elle doit tout d'abord être obligatoirement extérieure. Il existe, en effet, des voiliers à cabine arrière dont la barre de secours passe par le capot de descente ! En dehors du fait que l'angle de débattement est réduit, on imagine l'insécurité que représente une telle ouverture par mer formée. Dans un cas comme celui-ci, il eut été très simple de prévoir dans le toit du rouf un palier obturé par un nable pour y passer une rallonge de la mèche normale.

Ce dispositif de liaison doit être capable de supporter un moment au moins égal à celui exercé sur la mèche par la barre normale. Cette liaison doit être immédiate et ne nécessiter aucun outil ou démontage spécial. Il est souhaitable cependant qu'une fois en place la liaison puisse être verrouillé par un moyen positif.

Très souvent, cet organe de liaison se trouve décalé en hauteur, parfois d'une distance importante. S'il n'est pas possible de prévoir un palier intermédiaire, elle doit être capable de supporter le moment de flexion latérale qui en résulte.

Enfin, la barre elle-même doit être de longueur en rapport avec la taille du bateau et placer le barreur dans une position normale et aussi confortable que possible car ce genre d'accident ne se produit généralement pas à proximité d'un port et par beau temps. Un œil en bout de barre permettra de gréer un palan allégeant l'effort du barreur.

3 LE PRESSE-ÉTOUPE DE JAUMIÈRE

La présence d'un secteur sur la mèche, intérieur à la coque, implique un système d'étanchéité au sommet de la jaumière.

Ce peut être un classique presse-étoupe comme celui de l'arbre d'hélice, mais on utilise aussi souvent aujourd'hui des joints à lèvres. Ils demandent moins de surveillance qu'un presse-étoupe, assurent une meilleure étanchéité avec un frottement réduit, mais ils sont sensibles à l'abrasion du sable, toujours en suspension dans l'eau, et surtout ils nécessitent un démontage complet du secteur de barre, lorsqu'il faut les changer.

On choisira autant que possible des modèles utilisés sur des camions ou des moteurs de marques mondiales afin de pouvoir les trouver partout.

Dans le cas d'un presse-étoupe classique, il faudra laisser un espace suffisant entre le secteur et le dessus de la bague pour pouvoir changer la tresse sans démonter celui-ci.

E ▪ ACCASTILLAGES DIVERS ❁❁❁❁❁

1 RÉGLAGE DE PATARAS

Sur les voiliers de course, on utilise de plus en plus de systèmes de commande hydrauliques : pataras, hale-bas de bôme, étarquage de grand-voile, pied de mât, etc.

En croisière, ces systèmes n'offrent guère d'intérêt que pour le pataras et le hale-bas de bôme, bien que, dans le cas du premier, il soit toujours nécessaire de doubler le vérin d'un système de tenue mécanique, en cas d'accident.

Dans la majorité des cas, on utilisera un ridoir à volant, à poignée ou à manivelle, selon la taille du voilier et la course à absorber. Mais il est toujours nécessaire de prévoir un moyen de réglage rapide et de grande course pour régler convenablement l'équilibre sous voiles.

2 ENROULEURS DE FOC

Comme la langue d'Esope, l'enrouleur peut être la meilleure ou la pire des choses.

Dans *Voiles et gréement,* j'ai exposé les avantages et les inconvénients du système, décrit les différents types existants et donné les bases de calcul de la bosse de commande et de son winch de manœuvre. Le lecteur intéressé voudra bien s'y reporter.

J'ajouterai simplement que les systèmes de bosse de commande sans fin utilisant comme tambour une poulie à gorge crantée ne sont utilisables qu'avec des focs ne dépassant pas une dizaine de mètres carrés.

3 PANNEAUX DE PONT

La norme ISO 12216 définit de façon très précise les exigences de résistance et d'étanchéité de toutes les fenêtres, hublots, panneaux, tapes et portes extérieures dont sont équipés les navires de plaisance, selon la zone de la coque, du pont ou des superstructures où ils se situent.

Pour l'éclairage, pour l'aération, on fait de plus en plus appel à des panneaux de pont métalliques avec vitre en résine acrylique.

Le choix de ceux-ci doit répondre à un certain nombre de critères : respect des épaisseurs de glaces prévues par la norme, rigidité du cadre, absence de protubérances accrochant vêtements ou sacs à voiles, dispositif de blocage en position intermédiaire, fermetures de sécurité... et bien sûr étanchéité.

L'ouverture correspondante dans le pont doit être pourvue d'un cadre rigide et parfaitement dressé, si l'on veut conserver une bonne étanchéité.

La dimension minimum d'un panneau servant d'accès à une cabine est de **380** x **475** mm ou Ø **450**; il doit pouvoir être ouvert de l'intérieur, comme de l'extérieur, conformément à la norme ISO 9094.

Enfin, sur un voilier de croisière, il est bon de prévoir sur chaque ouverture une moustiquaire et la possibilité d'installer une manche à vent ou « fantôme ».

4 HUBLOTS

La réglementation reconnaît pour les hublots trois types de montages pour lesquels des épaisseurs différentes sont demandées : semi-encastrés (SF) correspondant aux montages de la FIGURE **9-10** et aux plaques collées, appuyés (SS) ou à la liaison élastique. Seuls les montages semi-encastrés peuvent être utilisés dans toutes les catégories de conception et toutes les zones du navire.

Les montages appuyés ne peuvent être utilisés que sur le pont et les superstructures. Sur un voilier, ces montages correspondent généralement aux hublots ouvrants dont la glace coulisse dans une feuillure. Les matériaux admis sont la feuille de méthacrylate de méthyle (*Plexiglas, Altuglas,* etc.), de polycarbonate et le verre feuilleté (*Triplex*) ou trempé. Ces derniers ne peuvent convenir bien sûr qu'au montage encastré type **d** et, sur les voiliers, ne sont admis que dans certaines zones.

C'est cependant la famille de résine acrylique qui est le plus couramment utilisée, en particulier pour son aptitude à supporter un certain galbe soit à froid, si celui-ci est peu important, soit à chaud.

L'étanchéité des hublots est assurée par une couche de joint incolore au silicone (*Rubson, Syligutt, Scotch-seal 5313*, etc).

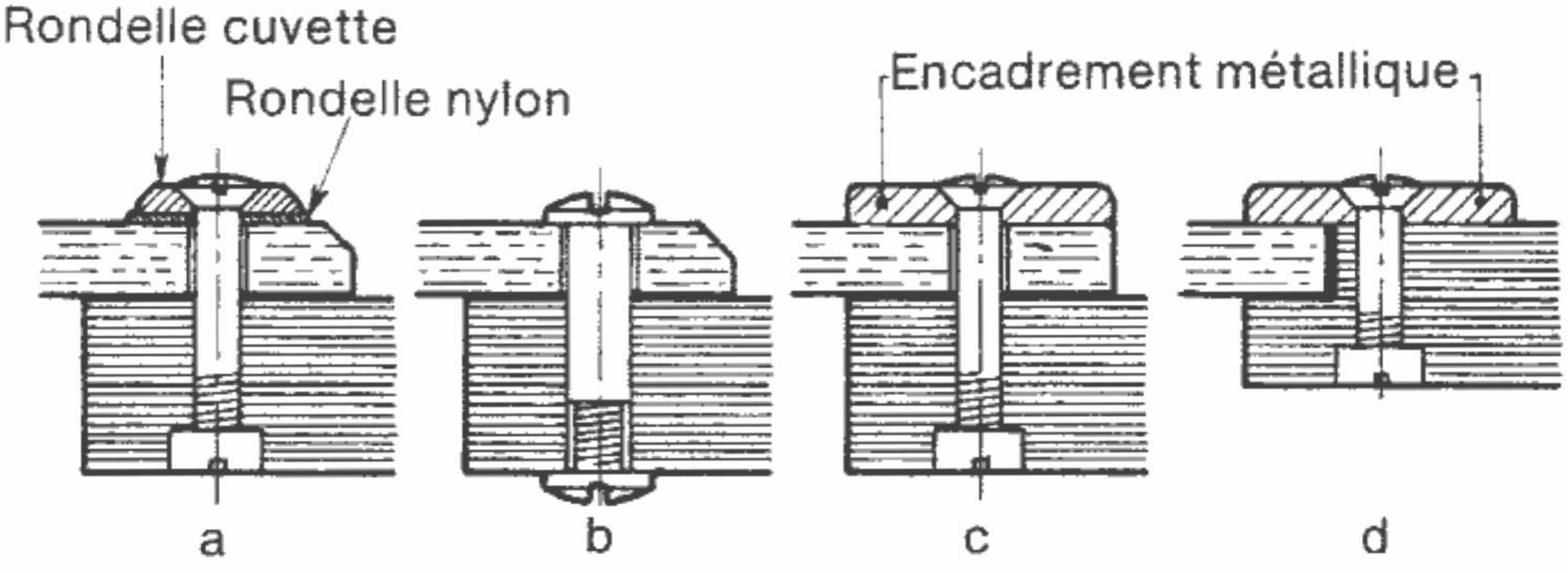


Fig. 9-10 • Différents montages de hublots en acrylique.

L'acrylique étant peu tolérant aux contraintes de cisaillement, le montage des vis doit s'opérer avec des précautions particulières. Le trou sera situé à une distance du bord au moins égale à deux fois son diamètre. Celui-ci sera supérieur de **1** à **2** mm à celui de la vis, et l'espace ainsi ménagé rempli de joint d'étanchéité. Un meilleur montage consiste à placer dans le trou une entretoise en nylon d'une longueur supérieure de **0,5** mm à l'épaisseur de la glace, le même jeu étant maintenu entre les diamètres du trou et l'extérieur de l'entretoise. Nécessitant des vis à tête très large, il s'adapte particulièrement bien aux montages types **a** et **c**.

On n'utilisera bien sûr jamais de vis à tête fraisée sinon avec une rondelle cuvette décolletée (montage type **a**), et encore moins des vis auto taraudeuses vissées de l'intérieur directement dans le hublot, comme je l'ai vu une fois. Les vis de reliure (type **b**) sont constituées d'une vis à tête plate bombée et large et d'un écrou en forme de canon allongé avec une tête identique; elles existent en laiton, en alliage léger et en acier inoxydable.

Dans une construction en bois, on utilisera des écrous ronds noyés dans l'épaisseur de l'hiloire. Quel que soit le matériau, il faut éviter en effet tout écrou proéminent (même borgne) qui risque de provoquer des accidents graves lors de chocs à la tête. Si cela n'est pas possible, les écrous ou têtes de vis seront cachés sous une moulure ou un profilé.

L'encastrement des hublots peut être assuré soit par un profil métallique rapporté, soit directement dans l'épaisseur de l'hiloire. Un jeu de **1** à **2** mm doit être laissé sur le pourtour du panneau et rempli de mastic d'étanchéité.

Sur un bateau de croisière hauturière, on n'oubliera pas de prévoir des tapes de hublots à fixer en cas de très mauvais temps. ⚓

10

MOTORISATION

LA quasi totalité des voiliers d'aujourd'hui, même ceux dont la vocation est orientée vers la course, et en dehors de toute considération de jauge, sont équipés d'un moteur. Pour la majorité, ce moteur est fixe et de type diesel, essentiellement pour des raisons de sécurité, d'adéquation au milieu marin et de prix de carburant. Le hors-bord, dont la vitesse de rotation et le diamètre de l'hélice sont adaptés à une propulsion en vitesse plutôt qu'en poussée, n'est utilisé que sur des coques ne dépassant guère les 7 mètres.

Pour l'architecte, trois étapes interviendront dans l'étude de la motorisation : le choix de la puissance, celui de l'hélice, l'installation.

A ■ DÉTERMINATION DE LA PUISSANCE

Toutes contingences extérieures telles qu'encombrement, emplacement du moteur et de l'hélice, etc., étant exclues, la détermination de la puissance dépendra de deux éléments : les caractéristiques du voilier, d'une part, les conditions de navigation au moteur, d'autre part. Le premier élément étant déjà connu, il restera à définir le second.

Le moteur sera-t-il destiné seulement à assurer les manœuvres de port ou bien sera-t-il un véritable auxiliaire, relayant la voile lorsque le vent sera absent ou la soutenant s'il faut remonter au vent dans du mauvais temps ? Quelle sera la durée des parcours au moteur et quelle vitesse voudra-t-on soutenir dans quelle force de mer ?

Quelle perte de vitesse due à la traînée de l'hélice sera admise, lors de la marche sous voile ? Enfin le moteur devra-t-il assurer, en plus de la propulsion, l'entraînement d'un groupe frigorifique ou d'un alternateur supplémentaire ou d'une puissance supérieure à celle prévue d'origine ?

Ce dernier paramètre permettra de déterminer la différence entre la puissance brute (y compris celle nécessaire aux auxiliaires) et la puissance nette utilisable pour la propulsion seule.

Cette puissance sera absorbée par la résistance qu'oppose la coque à son déplacement dans l'eau et l'air. Or, nous savons que, pour des coques à déplacement, cette résistance s'accroît rapidement avec la vitesse pour atteindre une valeur maximum correspondant à une « vitesse limite » * liée à la longueur de flottaison de la coque. La relation entre la vitesse et la longueur est définie par le degré de vitesse $\mathbf{R = V/\sqrt{L_f}}$. Si l'on prend **V** en nœuds et $\mathbf{L_f}$ en mètres, la vitesse limite d'une coque à déplacement sera atteinte pour **R = 2,4** environ. Pour un voilier de course léger aux lignes tendues, **R** pourra atteindre **2,8**.

La résistance à l'avancement totale (résistance de vague, de frottement et de sillage) correspondante varie entre **30** et

* Voir TOME 1 - CHAPITRE 5.

40 daN par tonne de déplacement *, la valeur la plus faible correspondant à un voilier de course aux lignes tendues et à faible surface mouillée, le maximum à un voilier lourd à quille longue. Le graphique de la FIGURE **10-1** permet de déterminer la valeur approchée de cette résistance à partir du degré de vitesse et du rapport déplacement/longueur **D/(L/100)³**.

Ainsi, un voilier de croisière de **9** m de flottaison et déplaçant 7 tonnes aura un rapport :
D/(L/100)³ = 7/0,09³ = 9 600, et pour **R = 2,4**, sa résistance à l'avancement sera de **32** daN/tonne environ, soit au total :
32 x 7 = 224 daN à une vitesse de **2,4** $\sqrt{9}$ **= 7,2** nœuds.

En plus de la résistance de l'eau, le fardage de la coque et du gréement dans un vent relatif de **7,2** nœuds représentera un supplément assez modeste de l'ordre de **5** daN, soit un total de **230** daN environ.

Mais supposons maintenant que l'on veuille pouvoir remonter dans du mauvais temps contre un coup de vent de face de **35** nœuds. La seule augmentation de résistance due au vent réel s'élèvera à **120** daN, celle due aux vagues, en comptant une longueur entre crêtes égale à **1,5** à **2** fois celle de la coque, doublera la résistance à l'avancement de la carène. On atteindra alors un total de **570** daN environ soit **2,5** fois la résistance par temps calme. Il est bien évident qu'il ne sera pas possible, dans ces conditions, de maintenir la vitesse maximum si l'on ne veut pas trop fatiguer le bateau... et son équipage, et qu'aucune hélice fixe ne pourra conserver un rendement convenable sur une aussi large plage de poussée. Il faudra donc calculer une poussée correspondant aux conditions que l'on aura choisies comme étant les plus couramment rencontrées.

Ainsi, pour notre exemple, en choisissant une marge de **25 %** de réserve de poussée cela nous donnera :
230 x 1,25 = 287,5 daN soit **40,25** daN/t pour une vitesse maximum de **7,2** nœuds.

Il est bien évident que dans des conditions plus clémentes on maintiendra une vitesse de croisière plus économique correspondant à un degré de vitesse **R = 2,2**. Dans ce cas, la poussée nécessaire serait de **22 x 7 = 154** daN plus le fardage estimé à **2 %** soit **157** daN.

Ayant défini la poussée maximum, il est possible de connaître la puissance à l'hélice $\mathbf{P_h}$ correspondante par la formule : $\mathbf{P_h}$ **= Rés . V . 0,005**, soit, pour notre exemple :
287,5 x 7,2 x 0,005 = 10,35 kW ou **14,1** cv **.

Cette puissance est celle qui sera effectivement transformée en poussée par l'hélice. Pour connaître celle qui sera réellement absorbée par celle-ci, il faut tenir compte de son rendement.

* Pour une carène propre.

** Rappelons que 1 cv = 0,735 kW et 1 kW = 1,36 cv.

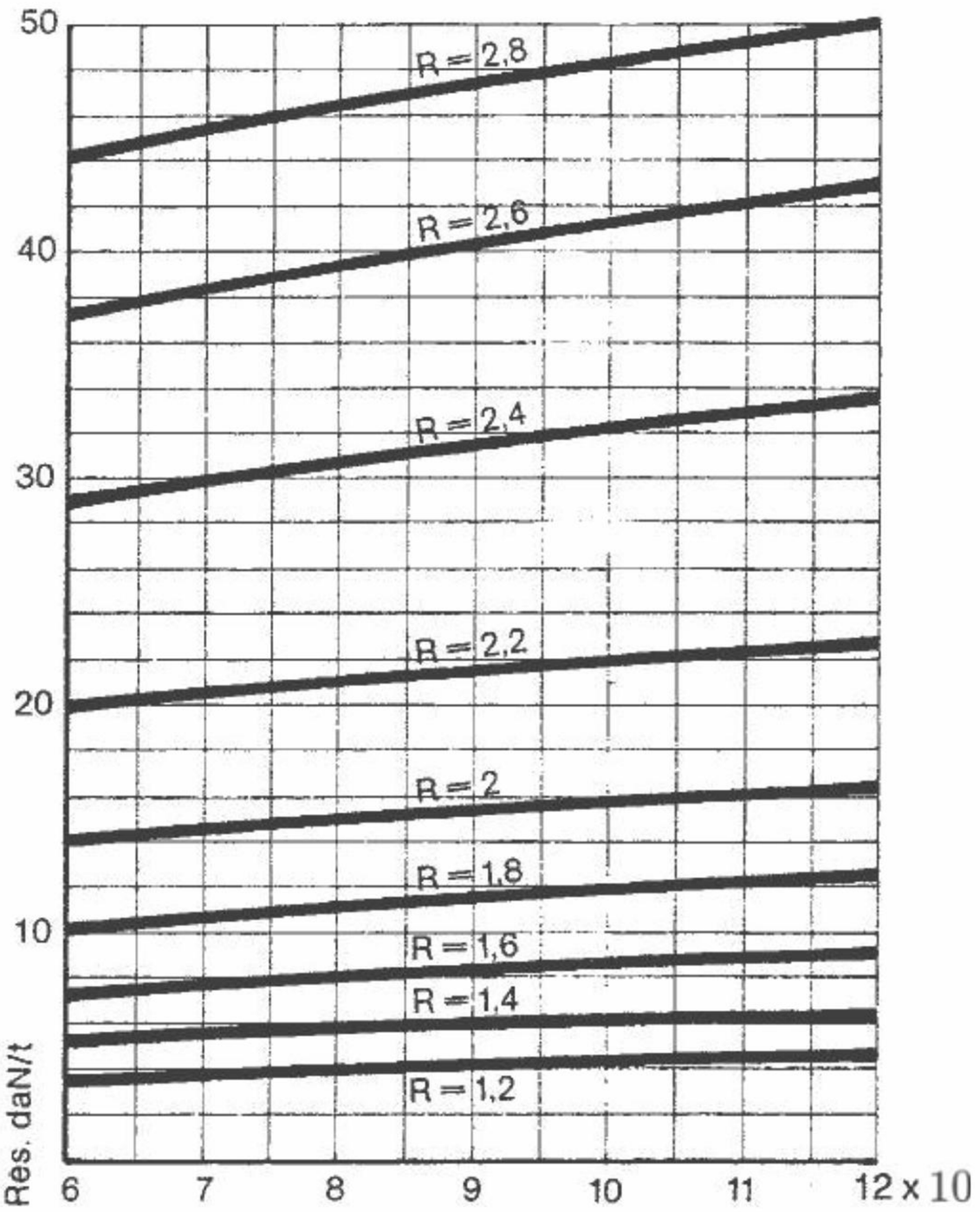


Fig. 10-1 • Résistance à l'avancement en daN/t en fonction du rapport déplacement/longueur pour les degrés de vitesse de 1,2 à 2,8 (en m et nœuds).

Pour une hélice de grand navire dont tous les paramètres sont parfaitement définis, le rendement maximum pourra atteindre **75 %**.

Il n'en est malheureusement pas ainsi pour le voilier dont le rendement de l'hélice dépassera rarement **50 %** et tombera plus souvent au voisinage de **35 %**. Avec un rendement estimé à **45 %**, la puissance sur l'arbre d'hélice devra être, pour notre exemple : $\mathbf{P_a}$ **= 10,35 x 100/45 = 23** kW.

Mais les pertes enregistrées sur le rendement de l'hélice ne sont pas les seules dont aura à souffrir le système de propulsion. En remontant vers le moteur, la suivante sera due aux paliers de la ligne d'arbre. Pour une ligne d'arbre classique sans dispositif de graissage particulier autre que la circulation d'eau par le palier d'étambot, la perte est de **2 %** environ. Mais attention, un presse-étoupe trop serré ou un défaut d'alignement peuvent doubler cette perte.

La dernière avant le moteur viendra de l'organe de liaison entre l'arbre d'hélice et le moteur : l'inverseur-réducteur. Elle dépendra du principe de celui-ci. Un modèle purement mécanique avec embrayage par crabots et réduction au

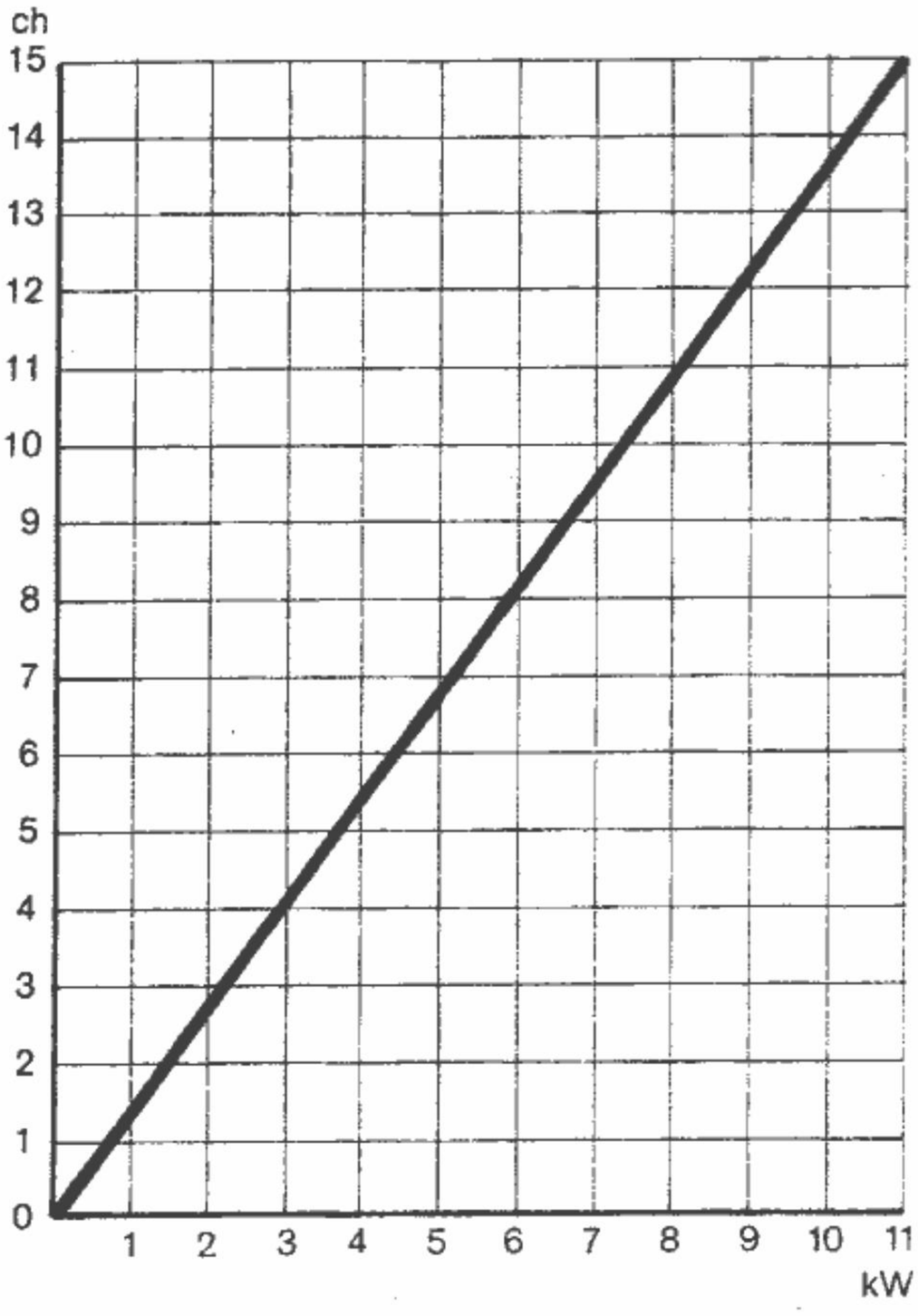


Fig. 10-2 • Conversion chevaux-kilowatts.

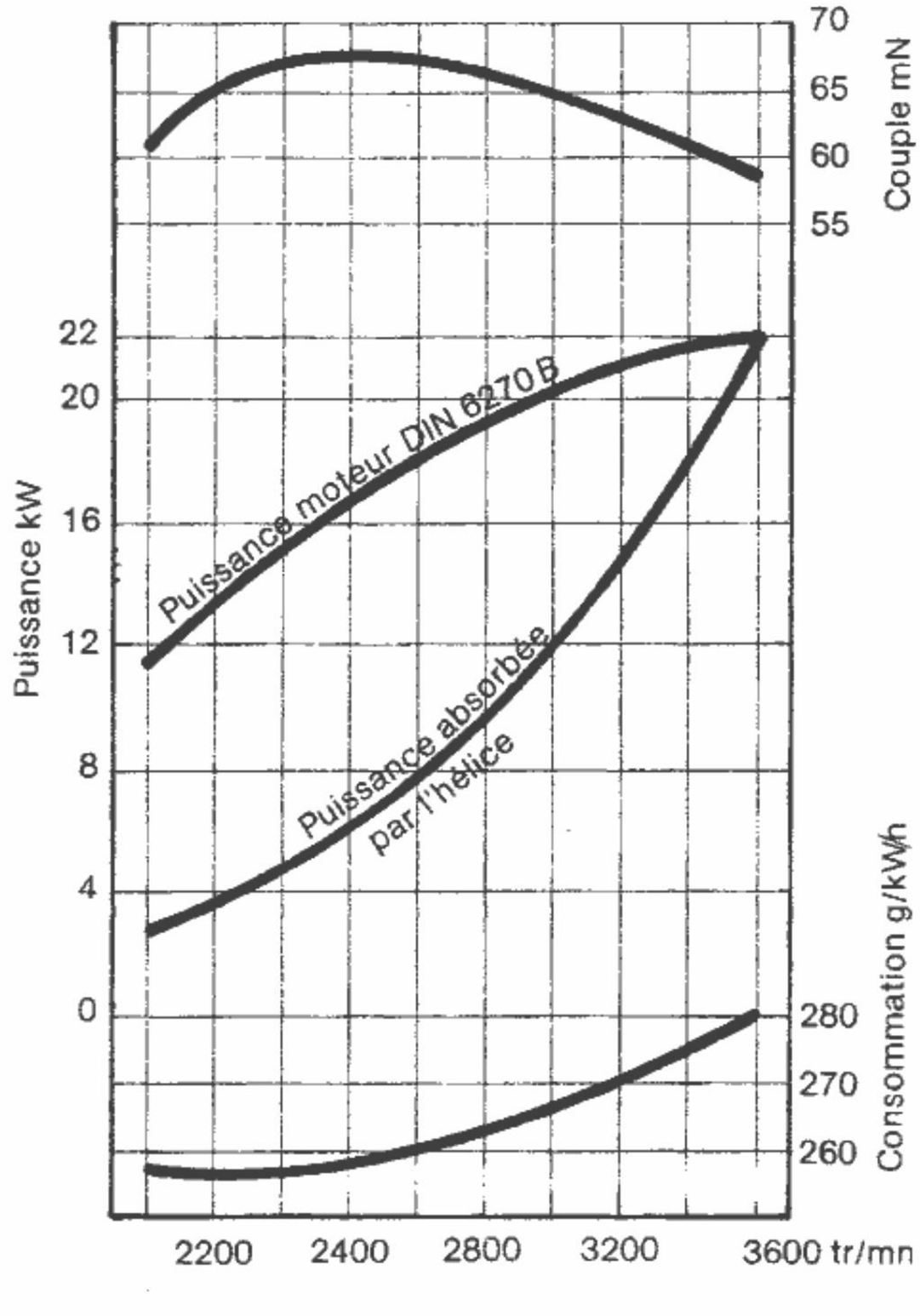


Fig. 10-3 • Exemple de courbes caractéristiques d'un moteur marin Nannidiesel 4,110 HE : couple, puissance disponible, puissance absorbée par l'hélice, consommation.

rapport **2/1** entraînera une perte de **4** à **5** % alors qu'un multidisques à commande hydraulique genre Paragon atteindra **8** % et un système entièrement hydraulique genre Borg-Warner **15** %.

Dans notre cas, avec une ligne d'arbre classique et un inverseur-réducteur mécanique, la perte dans la transmission sera de **2 + 4 = 6 %** et la puissance nette en sortie du moteur devra atteindre : $\mathbf{P_s}$ **23** x **100/94 = 24,5** kW.

Il faudra y ajouter éventuellement la puissance absorbée par les auxiliaires non prévus dans l'équipement standard du moteur.

Pour un alternateur supplémentaire, par exemple, la puissance à prévoir est **2,2** fois celle fournie par celui-ci.

Ainsi, un alternateur de **160** A sous **14** V, soit **2 240** W, demandera une puissance de :

2 240 x **2,2 = 4 928** W = **4,93** kW = **6,6** cv.

Mais cette puissance n'est pas encore celle sur laquelle nous devrons établir les calculs, car, dans la réalité, les conditions de fonctionnement du moteur sont loin de l'idéal de la norme selon lequel les mesures sont effectuées.

Le confinement du compartiment moteur entraînant un moins bon refroidissement, un échappement long avec un pot à barbotage et un col-de-cygne à la sortie avec une hauteur importante entre les deux, un réglage plus ou moins précis, autant de raisons qui entraîneront une perte de puissance de **10** à **15** % environ et une valeur finale de la puissance qui s'élèvera à **24,5** x **100/85 = 28,8** kW soit près du triple de la puissance réellement nécessaire à vaincre la résistance à l'avancement.

À la vitesse de croisière correspondant à **R = 2,2** soit **6,6** nœuds, et en eau plate et sans vent, la puissance nécessaire serait :

- puissance absorbée par l'hélice :

$\mathbf{P_h}$ **157** x **6,6** x **0,005 = 5,2** kW

- puissance sur l'arbre :

$\mathbf{P_a}$**/25** x **100/45 = 11,5** kW

- puissance sortie :

$\mathbf{P_s}$ **= 11,5** x **100/94 = 12,25** kW

- puissance moteur :

$\mathbf{P_m}$ **12,25** x **100/85 = 14,4** kW

Voyons maintenant le graphique de puissance d'un moteur tel qu'il apparaît généralement sur les documentations des fabricants (FIGURE **10-3**).

Plusieurs courbes de puissance peuvent y être portées, correspondant à différentes conditions de mesure ou cas d'utilisation. Ainsi la puissance peut être mesurée selon la norme SAE (américaine) dans laquelle le moteur est nu, dépouillé de tous ses équipements, ou la norme DIN 6270 B (allemande, mais utilisée dans toute l'Europe) qui correspond sensiblement à la puissance réelle à la sortie du vilebrequin. On peut estimer, dans les types de moteurs concernés ici, que la puissance DIN est égale à environ 80 % de la puissance SAE. Une norme ISO 8665 doit régler ces différences.

Enfin, on peut considérer aussi différents réglages du moteur ou différents régimes de marche, par exemple : intermittent (sur 1 heure) ou continu (sur 24 heures). Dans le cas d'un voilier de croisière, c'est cette dernière valeur que nous devrons prendre en considération, malheureusement les documentations commerciales des fabricants sont la plupart du temps très discrètes sur ces points.

La puissance indiquée qui correspond à l'appellation du moteur, **25** kW, **31** kW... est celle fournie au régime maximum réglé par le fabricant pour des conditions de marche définies. Elle correspond au point maximum de la courbe.

De ce point, part une courbe dénommée puissance absorbée par l'hélice. Il s'agit d'une parabole cubique (ou d'indice proche de 3) qui correspond à la valeur théorique de la puissance absorbée par l'hélice, en fonction du nombre de tours. L'écart entre les deux courbes représente la réserve de puissance du moteur.

Si la documentation du moteur ne donne pas cette courbe, on peut la tracer à partir de la formule :

$P_X = P_{max}/(n_{max}/n_X)^3$

P_{max} et n_{max} étant la puissance et le régime maxi et P_X la puissance pour un régime n_X donné.

Nous disposons maintenant des éléments qui vont nous permettre de choisir le moteur convenable. Prenons par exemple, dans la gamme Nannidiesel, les modèles **4.110 HE** et **4.180** de **22** et **31** kW de puissance nominale. Nous avons calculé que la puissance brute absorbée par l'hélice serait de **28,8** kW en régime maximum et de **14,4** kW en vitesse de croisière. Avec le **4.110 HE**, il n'est pas possible d'obtenir la puissance maxi, et la puissance au régime de croisière serait atteinte à **3 200** t/mn.

Il faudra donc adopter le **4.180** qui nous donnera **28,8** kW à **3 200** t/mn et **14,4** kW à **2 550** t/mn une gamme de vitesses tout à fait convenable pour le confort et une usure du moteur raisonnable (FIGURE **10-4**).

Si des considérations de poids, d'encombrement et surtout de prix ne permettaient pas d'adopter la puissance ainsi

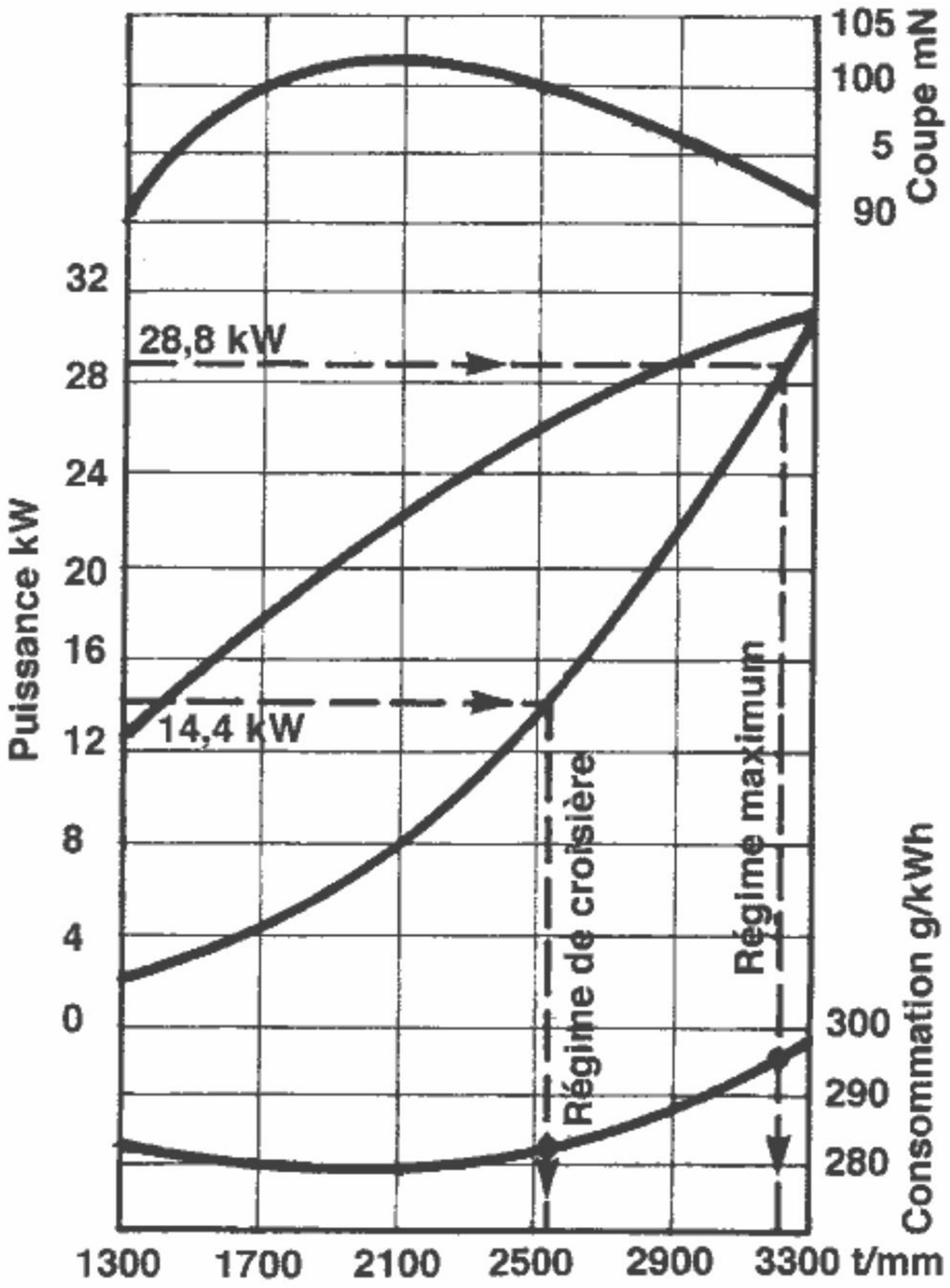


Fig. 10-4 • Courbes du moteur Nannidiesel **4.180** et situation des deux régimes auxquels il doit satisfaire, dans notre exemple.

déterminée, il faudrait refaire le calcul à partir de vitesses et donc de poussées moins élevées, ou tout au moins admettre une réduction de la vitesse maximum.

Accompagnant le graphique de puissance, on trouve généralement une courbe du couple moteur et de la consommation. Cette dernière est exprimée en grammes/kW/h ou en litres/h (la densité du gazole est d'environ **0,83** et celle de l'essence super de **0,79**). On voit ainsi qu'avec le moteur **4.180** la consommation au régime de croisière sera de **5,3** l/h et de **11,1** l/h au régime maximum, alors qu'avec le **4.110 HE** on aurait consommé **5** l/h au régime de croisière. La différence est faible, mais peut jouer en faveur du moteur le moins puissant. Lorsque le régime du moteur le moins puissant se trouve plus proche du maximum, il faut savoir que la tendance s'inverse et que, si l'on compare deux moteurs de même régime maximum (ce qui n'est pas le cas de notre exemple), le plus puissant — qui tournera donc le moins vite pour la même puissance absorbée — consommera le moins.

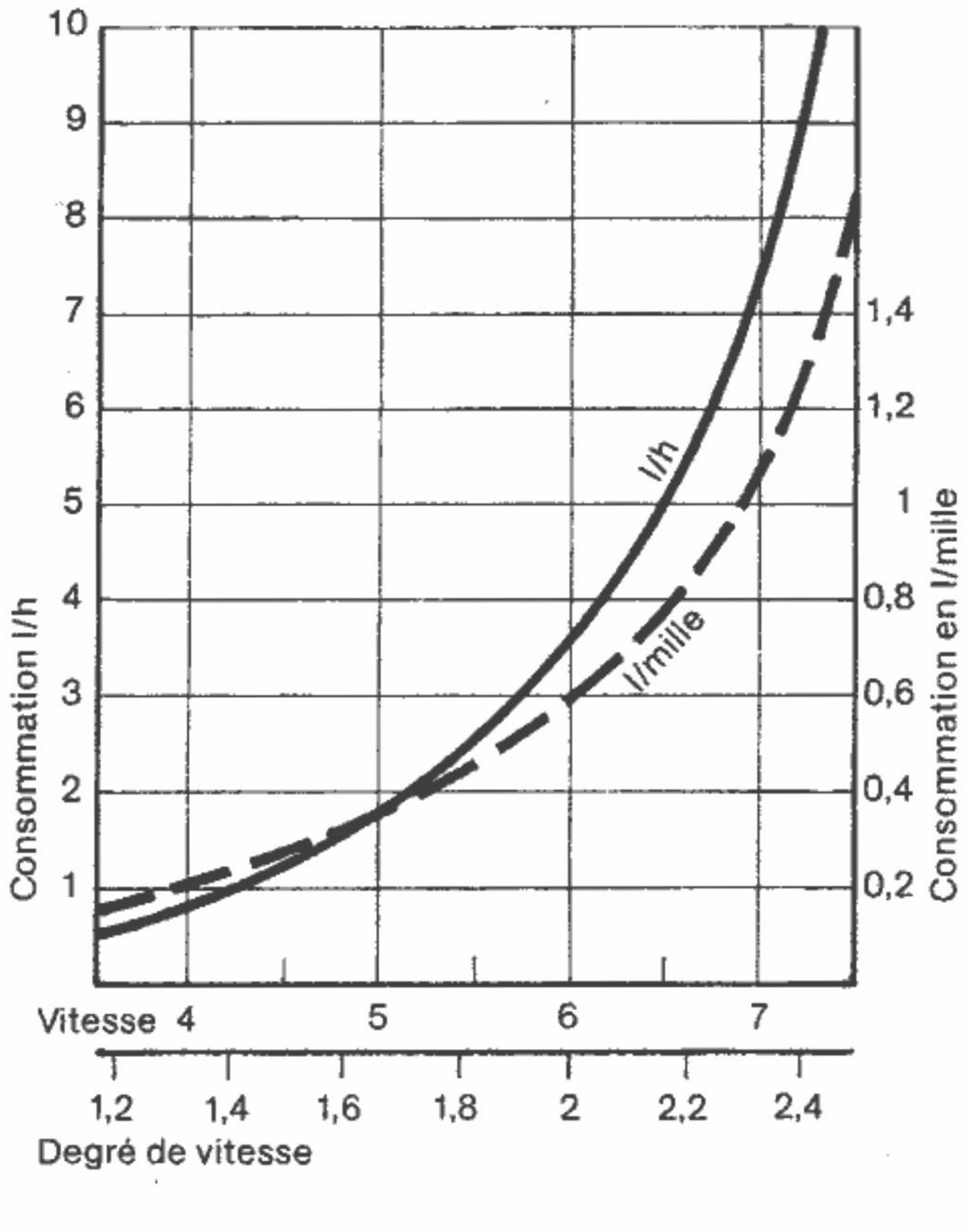


Fig. 10-5 • Exemple de graphique de consommation en l/heure et en l/mille en fonction de la vitesse ou du degré de vitesse.

Ces valeurs sont importantes à connaître pour déterminer la capacité des réservoirs et l'autonomie au moteur.

La capacité des réservoirs dépend du rayon d'action que l'on désire atteindre. Pour cela, il faudra tracer une courbe de consommation en fonction de la vitesse et des graphiques de la FIGURE **10-1** et du moteur.

Pour la gamme des degrés de vitesse de la FIGURE **10-1**, on calcule les vitesses, les poussées correspondantes et les puissances aux différents niveaux de la transmission.

En divisant la consommation en l/h par la vitesse, on obtient la consommation en l/mille que l'on peut représenter sur un graphique comme celui de la FIGURE **10-5**.

Dans cet exemple, les courbes de consommation baissent régulièrement avec la vitesse. Nous choisirons donc le régime économique en fonction du degré de vitesse **R = 1,6** où la courbe de résistance à l'avancement présente un creux et qui correspond à deux vagues dans la longueur *.

* Voir TOME 1 - FIGURE 5-7 - PAGE 108.

Ce degré est doublement favorable pour une marche au moteur, car la présence d'une vague à l'arrière accroît le rendement de l'hélice en augmentant la pression hydrostatique et le pourcentage de réduction de vitesse dans la couche limite.

A ce degré de vitesse, notre exemple donnera **1,6** l pour **4,8** milles soit **1** l pour **3** milles. Avec un réservoir de **30** l, et en tenant compte d'une réserve de **15 %**, on pourrait parcourir **76,5** milles en un peu plus de **24** heures.

La courbe de consommation de certains moteurs, en particulier les moteurs à essence, présente parfois un rebroussement entre **R = 1,2** et **1,6**. Pour obtenir le maximum d'autonomie, il faudra se tenir au degré de vitesse correspondant à ce rebroussement.

La feuille de calcul moteur permet d'effectuer tous les calculs de puissance et de consommation à partir des graphiques de la FIGURE **10-1** et du moteur.

On entre tout d'abord, en tête de la feuille, la longueur de flottaison en m, le déplacement en m³ et les rendements estimés de l'hélice $\mathbf{n_1}$, de la transmission $\mathbf{n_2}$ et du moteur $\mathbf{n_3}$. On obtient ainsi la puissance absorbée aux différents degrés de vitesse (ligne **15**). D'après le graphique du moteur (FIGURE **10-4**), on entre en ligne **16** les régimes de rotation. Si des accessoires supplémentaires doivent être entraînés par le moteur, on entre en ligne **14** les puissances nécessaires aux différents régimes du moteur. On obtient alors de nouvelles puissances absorbées et de nouveaux régimes. A partir de ceux-ci, on relève sur le graphique du moteur les consommations en g/kW/h que l'on entre en ligne **17**, d'où l'on obtient la consommation en l/mille. A partir de la consommation correspondant au degré de vitesse choisi (à entrer en cellule **J4**) et de la capacité en litres du réservoir (**J3**), on obtient l'autonomie en milles. Celle-ci est affectée d'un coefficient de **85 %** afin de maintenir une marge de sécurité nécessaire pour tenir compte de divers facteurs extérieurs : état de la mer, imprécision des jauges de carburant, etc.

Ayant choisi le moteur, il nous reste à calculer les caractéristiques de l'hélice qu'il va entraîner.

B ▪ CALCUL DE L'HÉLICE

Le rendement optimum d'une hélice ne peut être obtenu que pour un seul ensemble des trois caractéristiques suivantes : puissance sur l'arbre, vitesse du bateau, vitesse de rotation de l'hélice.

Les deux premières dépendront du choix que l'on fera du régime auquel on voudra que le rendement de l'hélice soit optimum. Ce pourra être par exemple, le régime de croisière ou le régime maximum, ou un régime intermédiaire de façon à équilibrer les pertes du rendement entre les deux extrêmes.

Prenons par exemple le régime de croisière. Avec le **4.180**, nous avons vu que la puissance moteur serait de **14,4** kW, ce qui, compte tenu des pertes au niveau de l'installation, du réducteur et de la ligne d'arbre, donnerait **11,5** kW sur l'arbre. Ceci pour une vitesse du bateau correspondant à un degré de vitesse **R = 2,2** soit **6,6** nœuds.

Une première correction doit être apportée à cette vitesse. En effet, nous savons qu'il existe autour de la coque une couche limite dans laquelle la vitesse passe progressivement de **0** à la vitesse de la carène. A l'arrière, l'épaisseur de cette couche limite est importante et l'hélice va donc travailler dans une eau partiellement entraînée par la carène. Le pourcentage de réduction de vitesse dépend de l'emplacement de l'hélice et du type de voilier.

On pourra l'estimer aux valeurs suivantes :

TABLEAU 10/I

Voilier léger avec hélice dégagée mais dans l'axe	10%
Voilier léger avec hélice décalée sur le côté	6%
Voilier mixte avec hélice en cage dans l'axe	20%
Voilier mixte avec hélice décalée ou deux hélices	10%

Dans notre exemple, nous supposerons que l'hélice est en cage et dans l'axe. La réduction sera donc de **20%**, faisant tomber la vitesse à $\mathbf{V_L}$ = **5,3** nœuds.

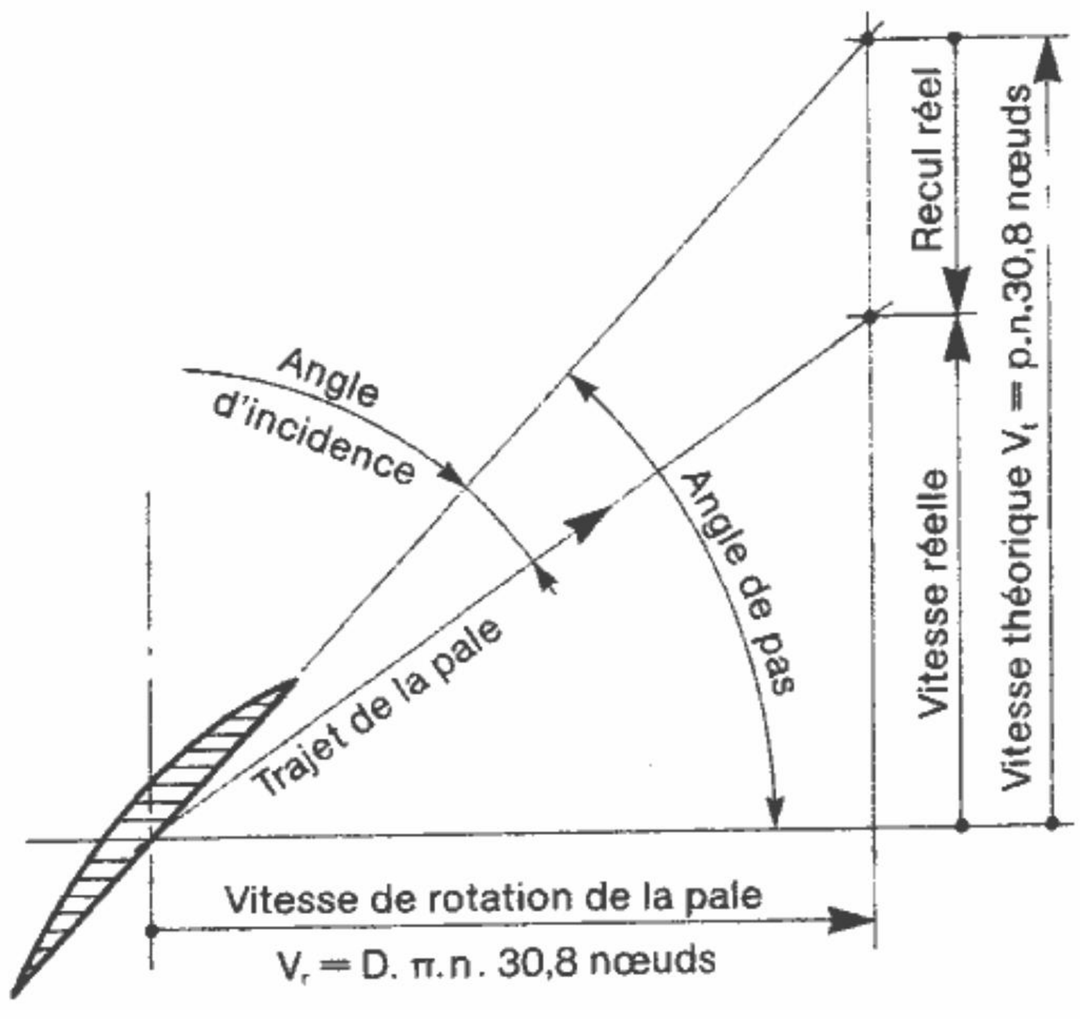


Fig. 10-6 • Représentation des vitesses de la trajectoire d'une pale d'hélice et du recul réel dû à l'angle d'incidence.

Pour comprendre comment déterminer la vitesse de rotation de l'hélice, il nous faut savoir maintenant comment celle-ci fonctionne.

La pale d'une hélice travaille dans l'eau comme une aile dans l'air. Elle développe sa poussée en présentant, par rapport à sa trajectoire dans l'eau un angle d'incidence (FIGURE **10-6**). Il en résulte que sa face avant est l'objet d'une baisse de pression alors que la face arrière subit une augmentation.

Si la différence entre les deux faces est trop élevée — on dit que l'hélice est surchargée — l'eau se transforme en bulles de vapeur et se produit le phénomène que l'on appelle cavitation. Celle-ci limitera la puissance qu'il est possible de transmettre par l'hélice en fonction de la surface totale de ses pales.

Par ailleurs, l'angle d'incidence définit une autre caractéristique de l'hélice que l'on appelle improprement le recul.

Si la pale se déplaçait dans l'eau sans incidence, donc sans exercer de poussée, elle avancerait en un tour d'une distance égale à son pas et à une vitesse théorique $\mathbf{V_t = p \times n/30,8}$ (en nœuds) égale à la vitesse dans la couche limite $\mathbf{V_L}$. Du fait de son incidence, la pale ne décrira pas dans l'eau un hélicoïde de pas égal au sien mais de pas inférieur, la différence d'avance sur un tour étant le recul réel. Mais comme l'eau dans la couche limite se déplace elle-même d'une certaine proportion de la vitesse du bateau, le recul apparent par rapport à celle-ci sera réduit d'autant.

Prenons un exemple. La vitesse de notre bateau est de **6,6** nœuds, soit **5,3** nœuds dans la couche limite. Si le pas de l'hélice est de **0,35** m et sa vitesse de rotation **1 000** t/mn sa vitesse d'avance théorique serait de **11,36** nœuds. Son recul réel serait :

$\mathbf{r_r = (11,36 - 5,3) \times 100/11,36 = 53\%}$

et son recul apparent :

$\mathbf{r_a = (11,36 - 6,6) \times 100/11,36 = 42\%}$

Contrairement à une idée parfois répandue, le recul représente une caractéristique physique du fonctionnement de l'hélice et n'est en aucun cas un élément d'appréciation du rendement de celle-ci. Par contre, sa mesure peut servir à déterminer la plus ou moins bonne adaptation de l'hélice, comme nous le verrons plus loin.

Les caractéristiques d'une hélice sont définies à partir d'un coefficient de charge :

$\mathbf{C_c = \sqrt{P_a} \cdot n / 9,76 \cdot V_L^{2,5}}$

avec :

$\mathbf{P_a}$: puissance sur l'arbre en kW ;

n : vitesse de rotation de l'hélice en t/mn ;

$\mathbf{V_L}$: vitesse dans la couche limite en nœuds.

La FIGURE **10-7** représente un graphique de synthèse établi par Juan BAADER (1) pour des hélices modernes à trois pales ayant les caractéristiques :

- surface projetée/surface inscrite = **50** %
- épaisseur de pale/diamètre = **4** %.

Un tel graphique permet de déterminer immédiatement les dimensions de notre hélice sachant que, pour un voilier, on évitera de dépasser **5** pour le coefficient de charge.
Si nous prenons $C_c = 5$ nous pourrons déterminer
$n = C_c \cdot 9{,}76 \cdot V_L^{2,5}/\sqrt{P_a}$,
soit : $5 \times 9{,}76 \times 5{,}3^{2,5}/\sqrt{11{,}5} = 922$ t/mn.

Ceci nécessiterait un réducteur de **2 550/922 = 2,76**

Le graphique nous donne un rendement $\eta = 48$ %, un coefficient de diamètre $\delta = 0{,}37$
et un rapport de pas $R_p = 0{,}65$
soit une hélice de diamètre
$D = 30{,}8 \cdot V_L/\delta \cdot n = 30{,}8 \times 5{,}3/0{,}37 \times 922 = 0{,}48$ m,
avec un pas $p = 0{,}48 \times 0{,}65 = 0{,}331$ m.

Refaisons maintenant le calcul avec la puissance maximum du moteur : **31** kW. À l'hélice, la puissance sera :
- avec perte sur le moteur :
$P_s = 31 \times 85/100 = 26{,}35$ kW
- avec perte sur le réducteur et la transmission :
$P_a = 26{,}35 \times 94/100 = 24{,}8$ kW.

La vitesse maximum prévue était de **7,2** nœuds, soit avec la perte dans la couche limite $V_L = 5{,}76$ nœuds.

La puissance maximum étant atteinte au régime de **3 300** t/mn, le régime à l'hélice sera de **1 076** t/mn donnant un coefficient de charge $C_c = \sqrt{24{,}8} \times 1\,076/9{,}76 \times 5{,}76^{2,5} = 6{,}9$ d'où risque de cavitation.
Le graphique de la FIGURE **10-6** nous donne alors :
rendement $\eta = 44$ %,
coefficient de diamètre $\delta = 0{,}32$,
rapport pas/diamètre $R_p = 0{,}61$.
Ce qui donnera une hélice de diamètre
$D = 30{,}8 \times 5{,}76 \times 0{,}32 \times 1\,076 = 0{,}515$ m
avec un pas de **0,314** m.
On constate que ces dimensions sont assez proches des précédentes pour qu'il n'y ait pas de trop grosse perte de rendement, selon que l'on choisira l'une ou l'autre des hélices. Dans notre cas, nous choisirons celle correspondant au régime de croisière.

À partir des dimensions optimums que l'on vient de définir, il est possible de faire varier les caractéristiques, mais il est certain que ce sera toujours au détriment du rendement.

• Vitesse de rotation

Il n'est pas toujours possible d'adapter un réducteur de rapport élevé. Néanmoins, sur un voilier, on évitera de dépasser une vitesse de rotation de **1 500** t/mn. Ainsi, le modèle fourni normalement avec le 4.180 est un Hurth de rapport **2,7/1**.

Au régime de croisière, la vitesse sur l'arbre sera donc de **2 550/2,7 = 944** t/mn.

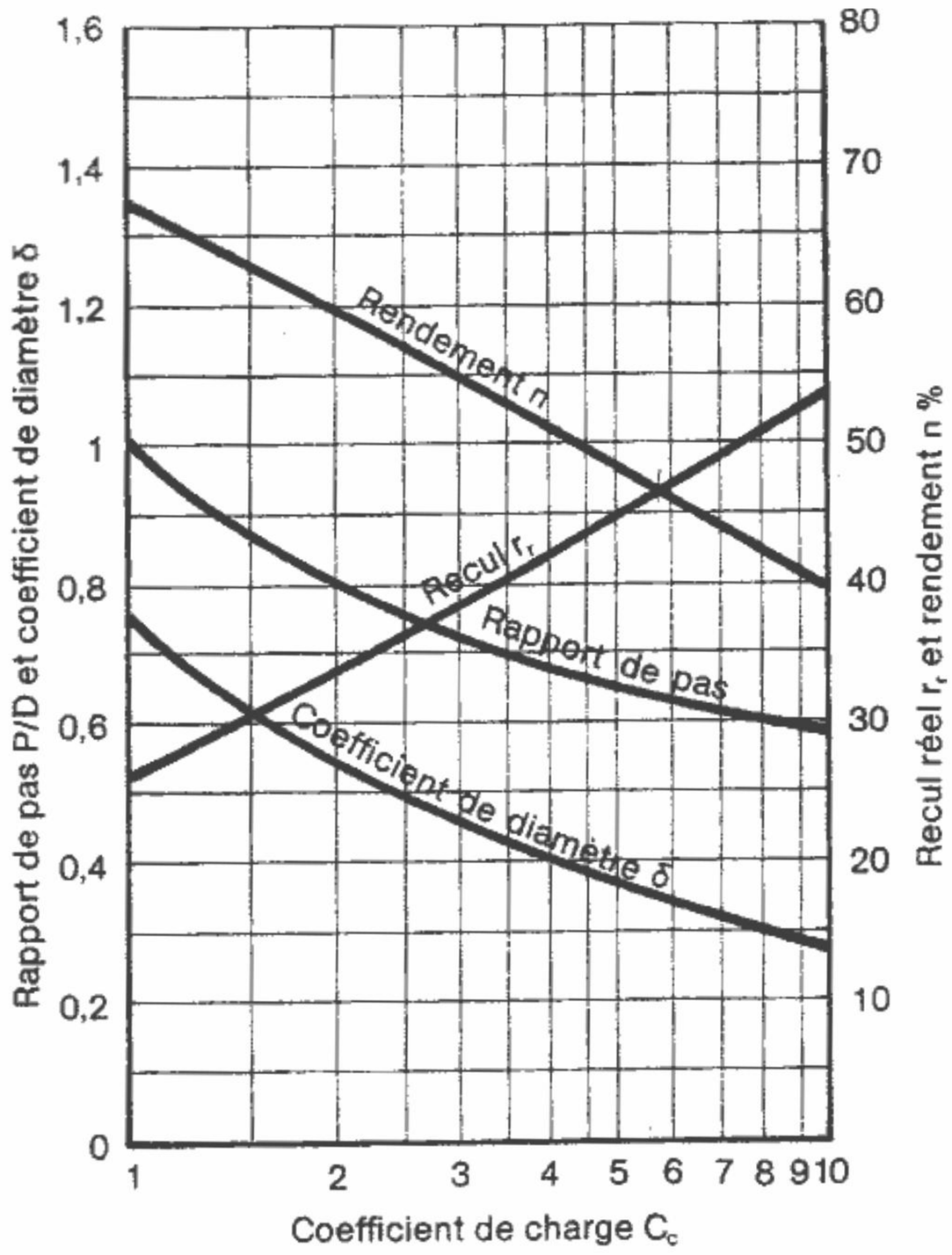


Fig. 10-7 • Courbes donnant les caractéristiques d'une hélice trois pales en fonction du coefficient de charge $C_c = \sqrt{P_a} \times n/9{,}76 \times V_L^{2,5}$.

Le coefficient de charge passera à **5,12**, le rendement tombera à **47,7** % et les dimensions de l'hélice seront, avec $\delta = 0{,}34$ et $R_p = 0{,}62$: diamètre **0,51** m et pas **0,31** m.

• Diamètre de l'hélice

Pour réduire la traînée lors de la marche sous voile, on peut désirer diminuer le diamètre de l'hélice. Celui-ci devra être compensé par une augmentation du pas. Le graphique de la FIGURE **10-8** indique quelle doit être cette variation et la perte de rendement correspondante.

On voit que jusqu'à une réduction de **10** % du diamètre, la perte est tout à fait acceptable, mais qu'elle commence à être importante au-delà de **15** %.

La perte de rendement se traduira bien sûr par une perte équivalente de vitesse que l'on peut chiffrer à $\sqrt[2,5]{\eta - \eta_r}$.

A titre d'exemple, une réduction de **15** % sur notre hélice de base ayant $D = 0{,}51$ m et $p = 0{,}31$ m nous amènera aux caractéristiques suivantes :
$D = 0{,}51 \times 85/100 = 0{,}43$ m
$p = 0{,}31 \times 120/100 = 0{,}37$ m
perte sur le rendement : **6** % d'où :
$\eta_r = 47{,}7 - 6 = 41{,}7$ %
perte de vitesse : $\sqrt[2,5]{47{,}7 - 41{,}7} = 2{,}05$
soit $6{,}6 \times 98/100 = 6{,}5$ nœuds.
Cette réduction est donc tout à fait acceptable.

• **Nombre de pales**

La diminution de la traînée de l'hélice lors de la marche à la voile peut également être obtenue par la réduction du nombre de pales. Le gain sera particulièrement sensible lorsque l'hélice sera placée dans une cage car, en la bloquant en position verticale, elle sera en grande partie cachée par l'aileron qui la précède. Néanmoins, du fait de la plus faible surface des pales et donc d'une différence de pression plus élevée entre ses faces, l'hélice bipale présentera plus de risques de cavitation, c'est pourquoi son diamètre devra être supérieur de **2,5** à **3%**, sans changer le pas. On peut admettre dans les cas qui nous intéressent ici une surface minimum de **25** cm² par kilowatt (puissance maxi en sortie moteur) ce qui donnerait, pour notre hélice de **0,43** m (ou **17** pouces) de diamètre et **24,8** kW, une surface minimum de **620** cm² soit un rapport surface de pale/surface du cercle inscrit $\mathbf{S_p/S_d = 620/1\,452 = 0,43}$, ce qui correspond à ce que l'on trouve pour ce genre d'hélice et qui oscille entre **0,3** pour une bipale et **0,5** pour une tripale.

Il vous sera cependant possible, comme nous l'avons vu plus haut, de ne pas procéder à une augmentation de diamètre et même de réduire celui-ci en augmentant le pas, si l'on accepte une perte de rendement et de vitesse, à condition de rester dans des limites raisonnables.

Ainsi nous pourrons adopter en définitive une hélice bipale ayant un diamètre $\mathbf{D = 0,43 \times 1,03 = 0,44}$ m et un pas $\mathbf{p = 0,37}$ m. La réduction de la vitesse de croisière de **0,1** nœud pourra facilement être compensée par une augmentation de la vitesse de rotation au prix, il est vrai, d'un léger accroissement de la consommation.

Le choix entre hélice tripale et bipale ne dépend pas seulement de considérations concernant la traînée. Dans le cas où elle est en cage, l'hélice bipale se trouvant à chaque demi-tour cachée par l'aileron, il pourra en résulter des vibrations toujours gênantes. On pourra cependant les réduire largement en donnant aux bords de la cage les sections que nous avons indiquées dans le TOME 1, PAGE 207, FIGURE 7-34. Celles-ci conduiront également à une amélioration importante du rendement de l'hélice par un meilleur écoulement de la veine d'eau.

En revanche, l'hélice bipale sera beaucoup moins perturbante pour le safran qu'une tripale.

À ce sujet on pose souvent la question de savoir si l'hélice doit être ou non bloquée lorsqu'on marche à la voile pour bénéficier du minimum de traînée. La réponse est définitivement : « oui, l'hélice doit, être bloquée ».

Les mesures effectuées FIGURE **10-9** (**2**) montrent en effet que seule une hélice tournant absolument librement, sans aucun frottement, présenterait une traînée inférieure à une hélice bloquée *.

* Les documents apportant des conclusions différentes reposent vraisemblablement sur des mesures effectuées sur des hélices tournant librement.

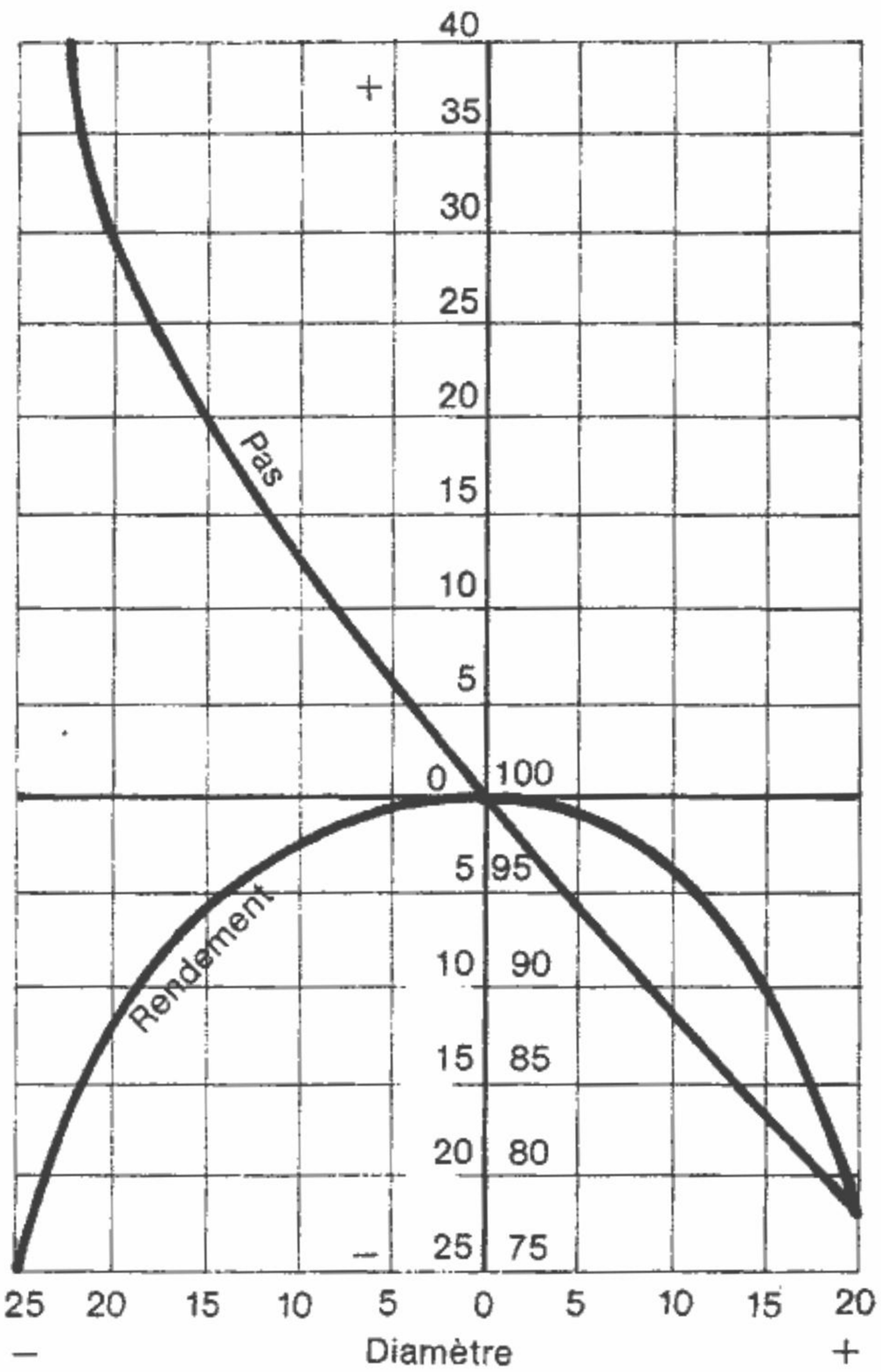


Fig. 10-8 • Diminution du rendement et modification du pas lorsque l'on fait varier le diamètre de l'hélice autour de sa valeur optimale.

Dès qu'une résistance s'oppose à la rotation, la vitesse se réduit et la traînée augmente, le pire étant atteint pour un régime de **100** à **200** t/mn où la traînée est trois fois plus élevée.

Si l'on considère les autres inconvénients qu'apporte une hélice laissée libre : bruit, parasites radio, usure des paliers et de l'inverseur-réducteur, parfois destruction rapide de celui-ci par mauvaise lubrification, tout voilier à moteur auxiliaire doit être équipé d'un dispositif de blocage de l'arbre.

Bien entendu, celui-ci doit être muni d'un système de sécurité empêchant tout embrayage intempestif.

Le système devra assurer le blocage de l'hélice dans la position la plus favorable, c'est-à-dire verticalement pour une hélice bipale et avec une pale vers le bas pour une tripale.

Ceci montre également qu'il est tout à fait illusoire d'espérer un rendement intéressant d'un dispositif de recharge de batterie par un alternateur branché sur la ligne d'arbre. En effet, l'hélice travaille alors à l'envers, la poussée de l'eau s'exerçant sur la face opposée à celle de la marche normale, donc dans de très mauvaises conditions.

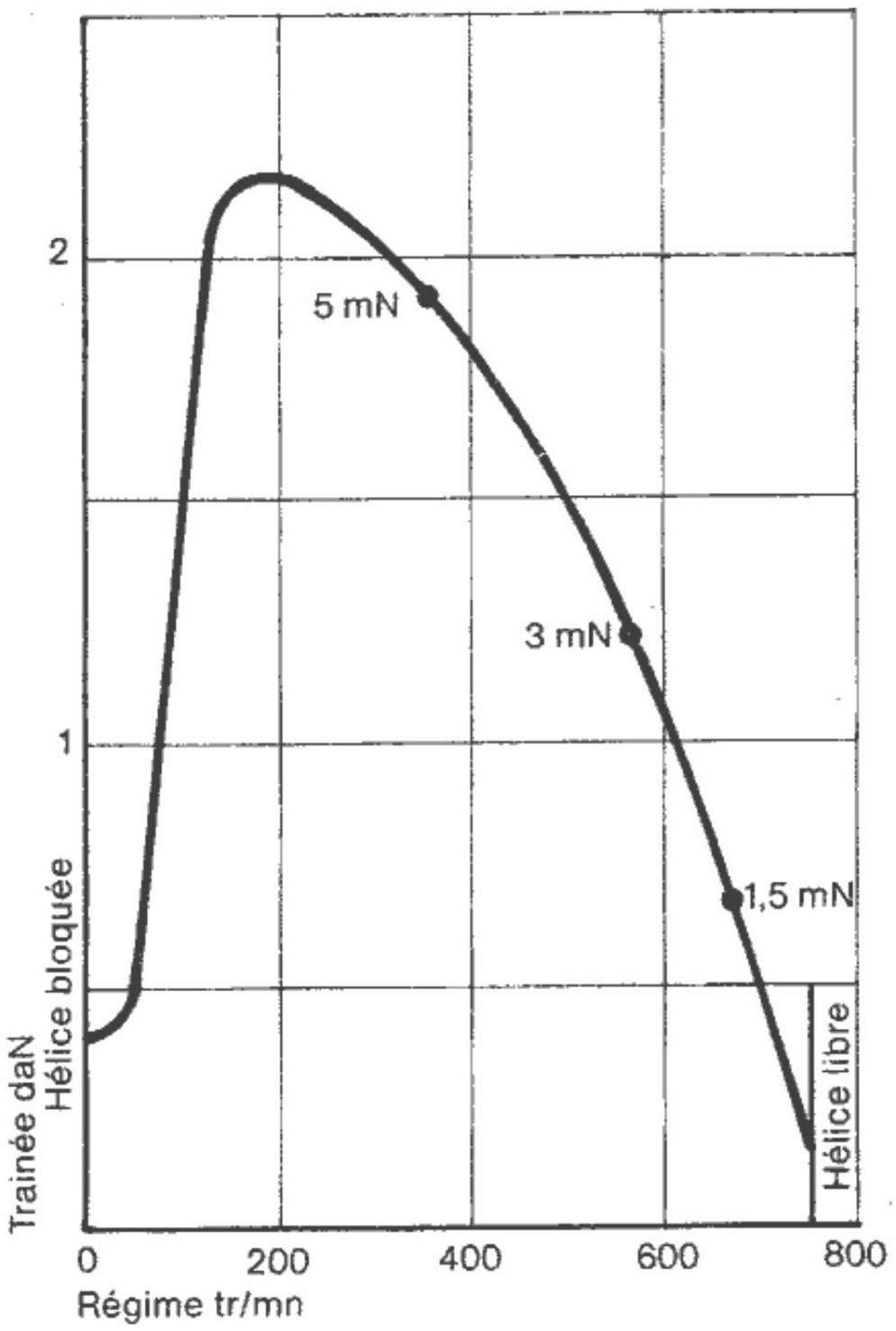


Fig. 10-9 • Courbe montrant la traînée d'une hélice de voilier dans un courant de 6 nœuds. Comme on le voit, il faudrait que la transmission soit à près exempte de tout frottement pour que la traînée soit inférieure à celle de l'hélice bloquée.

Le couple nécessaire pour entraîner l'ensemble réduit considérablement le régime et la traînée devient maximum pour une production de courant très faible. Ceci bien sûr ne concerne pas les systèmes autonomes dont l'hélice est d'un dessin totalement différent d'une hélice de propulsion.

Pour les voiliers de course, où l'on cherche avant tout une traînée aussi réduite que possible, on utilisera une hélice à pales repliables ou à mise en drapeau. Il faut cependant admettre que, la forme des pales et leur surface étant le résultat d'un compromis, le rendement d'une telle hélice ne pourra être aussi élevé.

Dans tous les cas, on choisira une hélice dont les deux pales sont reliées mécaniquement.

• Feuille de calcul hélice

La feuille de calcul « hélice » utilise les données de puissance et de régime fournies par la feuille de calcul « moteur », pour déterminer le choix de l'hélice selon les deux régimes « croisière » et « maxi ». Le coefficient de couche limite est relevé dans le TABLEAU **10-I** - PAGE **194**. Les rendements $\mathbf{n_2}$ et $\mathbf{n_3}$ sont ceux utilisés pour le calcul du moteur et les puissances et régimes correspondants, ainsi que le rapport du réducteur, sont ceux relevés sur la feuille de calcul « moteur ». Le coefficient de charge $\mathbf{C_c}$ est estimé.

On obtient, pour chaque régime, les caractéristiques d'une hélice, coefficient de charge, rendement, diamètre et pas.

Il faut alors choisir le régime, pour lequel on désirera obtenir le meilleur rendement et, pour cela il pourra être nécessaire de modifier certains paramètres. Dans notre exemple, si l'on désirait choisir le régime maxi, il faudrait changer de réducteur pour réduire le régime de rotation de l'hélice et obtenir un meilleur coefficient de charge.

Ces adaptations étant faites, on choisira, dans les catalogues des fabricants l'hélice la plus proche de celle correspondant à son choix.

Les dimensions étant pratiquement toujours en pouces, c'est dans cette unité que l'on entrera le diamètre en choisissant celui situé immédiatement au-dessus de la valeur métrique calculée et l'on adaptera le pas en conséquence à l'aide du graphique de la FIGURE **10-8**.

Nous avons vu précédemment qu'il était possible, lorsque cela était nécessaire, de réduire le diamètre. Les corrections du pas et du rendement se feront à partir du même graphique. Le diamètre définitif et les correctifs nécessaires seront introduits à partir de la ligne **23**. Si le rendement s'écarte par trop de celui estimé lors du calcul du moteur, on pourra reprendre celui-ci avec un nouveau rendement, mais la différence en fin du nouveau calcul d'hélice est généralement peu importante.

C ▪ LA TRANSMISSION

Celle-ci se compose de l'inverseur-réducteur et de la ligne d'arbre.

Sur les voiliers, le réducteur et l'inverseur sont généralement réunis en un ensemble unique assurant les deux fonctions. Les différents modèles se distinguent essentiellement par le dispositif de changement de marche qui, selon la puissance à transmettre sera simplement mécanique, l'embrayage étant assuré par des crabots ou des cônes, mécanique assisté, qui demande peu d'efforts et une course faible, ou hydraulique.

La sortie du réducteur est généralement en dessous de l'axe du moteur, ce qui a pour inconvénient de remonter celui-ci, mais peut avoir *a contrario* pour avantage de descendre l'arbre et de réduire ainsi l'inclinaison.

Dans des cas extrêmes, on peut utiliser un réducteur à sortie inclinée qui permet de ramener le moteur à l'horizontale, ou un accouplement style GKN Aquadrive, analogue à ce

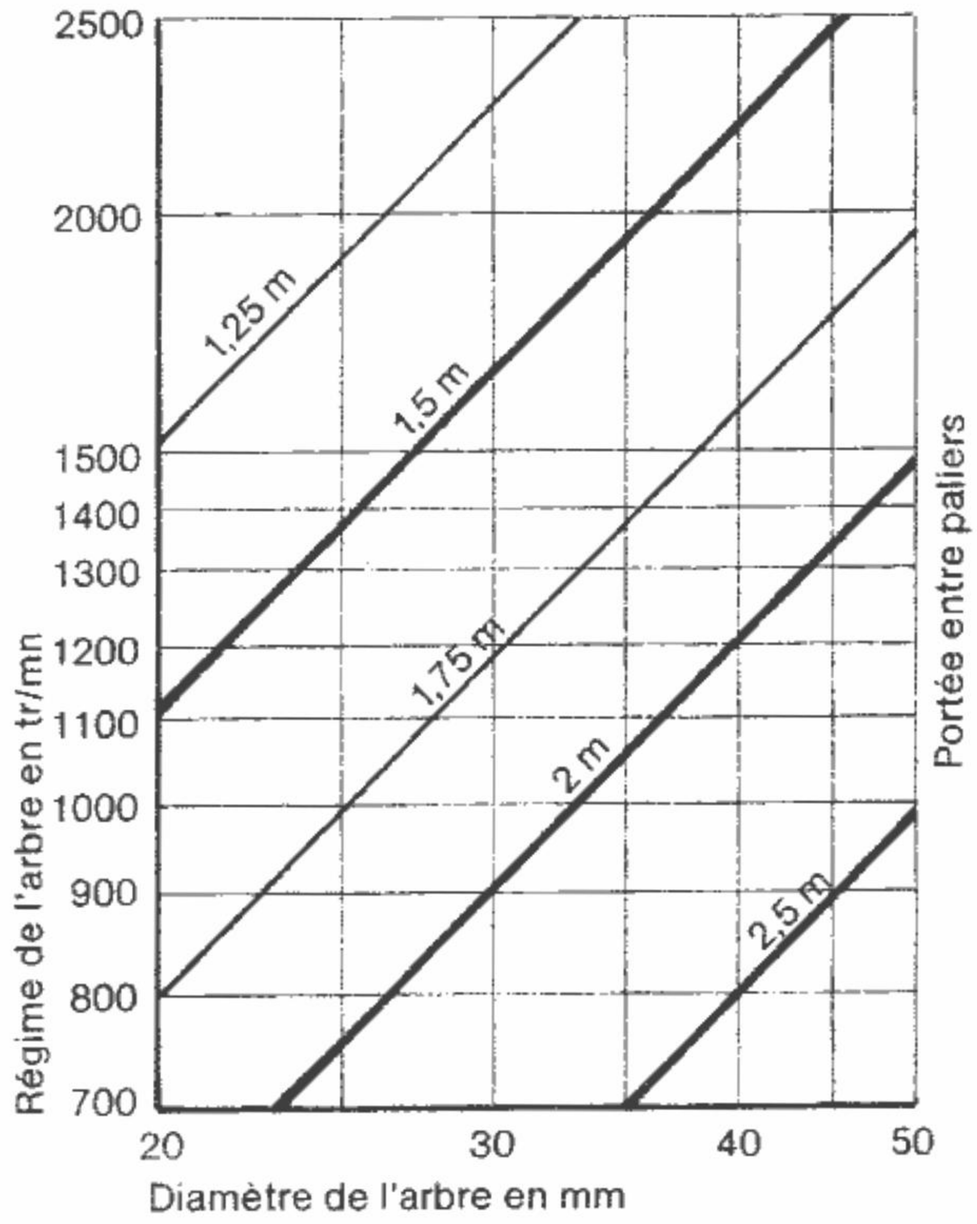


Fig. 10-10 • Portée maximum entre paliers en fonction du diamètre et du régime de rotation de l'arbre. (*D'après doc. Nannidiesel*).

qui est utilisé sur les automobiles à traction avant. Le plus petit modèle convient aux puissances jusqu'à **30** cv. La ligne d'arbre doit être alors du type rigide avec un palier à butée proche de l'accouplement pour transmettre la poussée de l'hélice. L'angle entre arbre et moteur peut atteindre **16°**. Une autre possibilité d'inscrire l'encombrement de l'installation dans les emménagements est fournie par la transmission en V qui renvoie le moteur vers l'arrière, mais ce type de transmission, comme les réducteurs à sortie inclinée, n'existe généralement que pour des puissances assez élevées.

Le diamètre de l'arbre de transmission est calculé en fonction du couple maximum à transmettre. Il sera donné par la formule :

$\mathbf{D \geq \sqrt[3]{6 . 10^4 . C/R}}$ avec :

C = couple maxi en mdaN;

R = résistance à la traction du métal en daN/mm².

On prendra dans les catalogues des fournisseurs le diamètre le plus proche de celui calculé.

Dans notre exemple, le moteur Nannidiesel *4.180* donne un couple maximum de **10,2** mdaN à **2100** t/mn, soit en sortie d'inverseur **2,7/1**, un couple de **10,2** x **2,7** = **27,5** mdaN. Pour un arbre en bronze d'aluminium ayant :

R = 65 daN/mm²

le diamètre : $\mathbf{D = \sqrt[3]{6 \times 10^4 \times 27{,}5/65}} = \mathbf{29{,}4}$ mm

On prendra un arbre de **30** mm.

Il est rare que sur un voilier la distance entre les points de soutien de l'arbre (paliers fixes, accouplements rigides) soit telle qu'il soit nécessaire de prévoir des paliers intermédiaires pour éviter qu'il ne « fouette ». On pourra le vérifier à l'aide du graphique de la FIGURE **10-10**.

Les métaux utilisés pour la réalisation des arbres d'hélice sont le plus souvent et par ordre décroissant : le bronze d'aluminium, l'acier inoxydable, le Monel.

Cet ordre correspond aussi à celui, croissant, des prix. Par contre, les caractéristiques mécaniques sont voisines, de **60** à **70** daN/mm² pour les bronzes d'aluminium au manganèse type B-21230, **60** daN/mm² pour l'acier inoxydable type Z 8 CNDT 17 12 et le Monel 400.

Ce dernier, en revanche, est le métal qui des trois résiste le mieux à la corrosion et l'acier inoxydable le moins bien au niveau des paliers du fait que le frottement de ceux-ci empêche la formation de la couche d'oxyde protectrice.

Afin de réduire les effets de la corrosion galvanique, l'arbre ou (et) l'hélice seront munis d'anodes sacrificielles et on veillera particulièrement à la cohérence des matériaux de ces deux parties mais aussi de leurs accessoires, écrous, clavettes, rondelles, etc.

L'extrémité des lignes d'arbres et le moyeu de l'hélice font l'objet des normes ISO 4566 et 8845.

Pour l'accouplement avec le tourteau, il est intéressant d'adopter exactement la même extrémité que pour l'hélice. Ainsi il est possible, lorsque l'arbre présente des signes d'usure au niveau des paliers, de le retourner.

Dans tous les cas, cette fixation doit être assurée par un moyen positif et non par simple serrage pour éviter tout risque de recul (ou de perte !) de l'arbre en cas de desserrage.

La longueur de l'arbre doit être calculée de façon à laisser un jeu longitudinal entre moyeu d'hélice et palier de l'ordre de 1/2 diamètre pour tenir compte de la tolérance dans la position du moteur et des déplacements dus au plateau d'accouplement ou aux silentblocs du moteur.

A l'autre extrémité, un jeu d'au moins **80** mm sera prévu entre le moyeu du tourteau et le presse-étoupe de façon à permettre le dégagement de celui-ci pour en changer la mèche.

D ▪ L'INSTALLATION MOTRICE ❋ ❋ ❋

Une fois déterminées les caractéristiques du moteur et de l'hélice, il nous reste à étudier leur montage afin d'obtenir une installation permettant d'assurer le meilleur rendement possible, facile à entretenir, silencieuse…

De nombreuses normes couvrent l'installation des moteurs et de leurs accessoires.

ISO 7840 - Tuyaux souples résistant au feu, pour carburant.

ISO 8469 - Tuyaux souples ne résistant pas feu, pour carburant.

ISO 10088 - Installations à combustible installées à demeure et réservoirs fixes correspondants.

ISO 11105 - Ventilation du compartiment contenant le moteur à essence et/ou son réservoir.

1 MONTAGE DU MOTEUR

Celui-ci dépend avant tout du type de ligne d'arbre utilisé. On rencontre trois types principaux :

- ligne d'arbre rigide avec moteur fixe,
- ligne d'arbre rigide avec moteur « flottant »,
- ligne d'arbre souple avec moteur « flottant ».

Le premier type est utilisable avec des puissances jusqu'à une dizaine de kilowatts.

La ligne d'arbre est portée par deux paliers, l'un à l'extérieur de l'étambot, l'autre à l'intérieur portant le presse-étoupe assurant l'étanchéité. Les deux paliers sont reliés par un tube vissé et leur lubrification est assurée par l'eau de mer pénétrant par des ouïes de chaque côté du palier extérieur ou par une prise d'eau aboutissant au palier intérieur.

La liaison entre l'arbre et la sortie de l'inverseur se fait par l'intermédiaire d'un plateau d'accouplement flexible pour absorber les petites erreurs d'alignement et éviter de transmettre les vibrations du moteur à la ligne d'arbre.

Les pattes du moteur sont fixées sur les carlingues des bateaux en bois ou en stratifié par boulons avec écrous et contre-écrous (ou dispositif d'arrêt) logés en chapelle. On interpose en général entre les pattes et les carlingues une cale de néoprène dur de **2** ou **3** mm (FIGURE **10-11**).

Les vibrations étant intégralement (ou presque) transmises au bateau, ce type de montage doit être abandonné au bénéfice du deuxième dès que la puissance dépasse **10** kW, surtout avec un diesel mono cylindre.

Le montage de la ligne d'arbre reste identique si ce n'est que la lubrification par prise d'eau sur le palier intérieur devient indispensable. Le passe-coque sur lequel sera branchée cette prise d'eau (commun à la prise d'eau de refroidissement par exemple) sera placé suffisamment loin en avant pour ne pas être dans la zone d'aspiration de l'hélice.

Le presse-étoupe est souvent pourvu d'un graisseur qu'il ne faudra pas oublier de garnir. Il est préférable que l'accessibilité du presse-étoupe soit aisée pour pouvoir en contrôler facilement le bon fonctionnement.

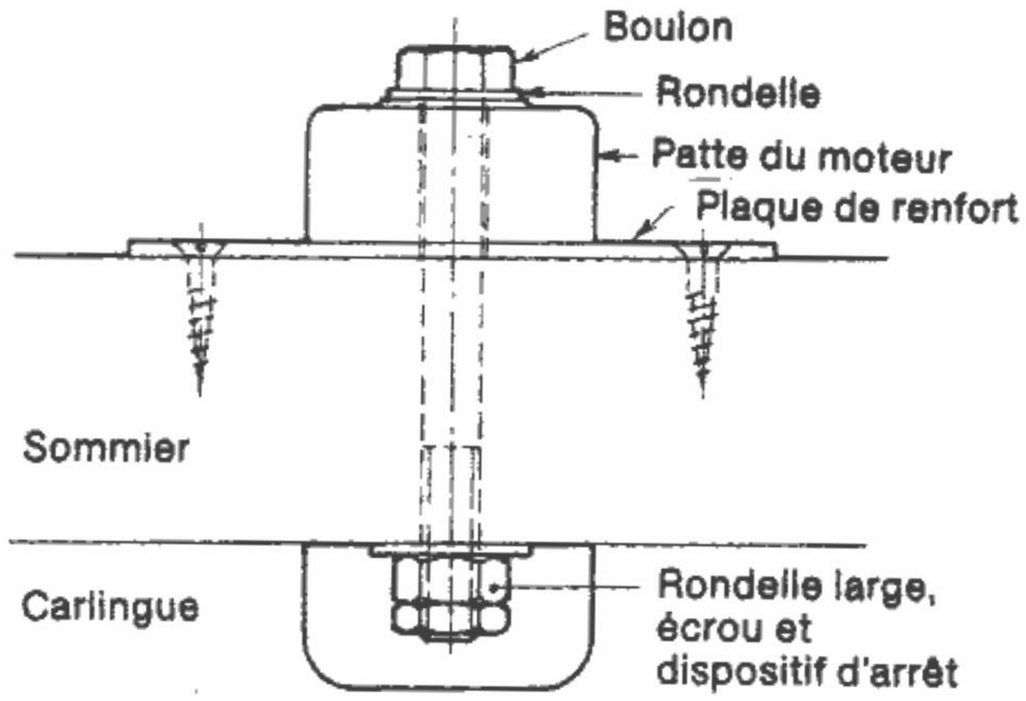


Fig. 10-11 • Montage des pattes de moteur sur le sommier dans le cas d'un moteur fixe.

Néanmoins, il peut être commode de monter un graisseur à distance. Si la longueur libre est trop importante, le mieux est de monter un arbre intermédiaire porté par deux paliers et relié à l'arbre, d'un côté, et au moteur, de l'autre, par deux plateaux d'accouplement souple.

Les pattes du moteur seront fixées sur des silentblocs permettant un réglage dans toutes les directions et capables d'encaisser la poussée de l'hélice. Il faut s'assurer que ceux-ci sont conçus pour supporter les efforts transmis par le moteur dans toutes les directions, y compris la position tête en bas. Ces efforts peuvent en effet être très élevés.

La fixation des silentblocs se fera par boulonnage sur une plaque métallique comme dans le montage précédent. Le plateau d'accouplement devra également pouvoir encaisser tous les mouvements du moteur. On améliorera souvent les problèmes de vibration et de vieillissement anormal de la transmission en utilisant un accouplement souple avec butée, genre *Angleflex* de Vetus. La poussée de l'hélice n'est plus transmise au navire par le moteur, mais par une butée s'appuyant sur une varangue du bâti moteur. L'accouplement isole ainsi mécaniquement l'arbre d'hélice du moteur autorisant un décalage angulaire de quelques degrés et permettant d'utiliser pour le moteur, des silentblocs plus isolants.

Sur les voiliers avec chaise extérieure, le montage d'une ligne d'arbre souple n'implique qu'un seul palier, celui porté par la chaise. Mais on peut également monter une ligne d'arbre souple dans un étambot. Le tube d'étambot y est alors scellé et porte à l'extérieur un palier et à l'intérieur le presse-étoupe flottant. Il doit être d'un diamètre suffisant

pour permettre les débattements dus aux mouvements du moteur.

Le presse-étoupe flottant est directement fixé sur ce tube ou sur une embase par l'intermédiaire d'un manchon de néoprène armé qui doit être tenu de chaque côté par deux colliers de serrage.

Avec ce type de ligne d'arbre la liaison entre l'arbre et la sortie du moteur se fait par un plateau d'accouplement rigide ou flexible. La fixation du moteur se fait comme dans le cas précédent.

Il est extrêmement important, non seulement pour des raisons de transmission des vibrations, mais aussi pour maintenir un alignement correct de l'arbre et du moteur (même si la tolérance est plus grande avec une ligne d'arbre souple), que le couple carlingage et étambot ou chaise constitue un ensemble le plus rigide possible. En particulier, les carlingues et la pièce recevant le palier intérieur de l'arbre d'hélice devront constituer un ensemble monobloc.

L'inclinaison de l'ensemble propulsif dans le plan vertical doit être aussi réduite que possible et en aucun cas supérieure à **15°**, sauf spécification particulière du fabricant. En effet, les mouvements de tangage augmentent encore cet angle et il risque d'y avoir des difficultés de lubrification, même si les moteurs marins sont étudiés en tenant compte de cette préoccupation.

2 COMPARTIMENT MOTEUR

On peut difficilement fixer une règle pour déterminer les dimensions minimums du compartiment moteur et aucune réglementation ne s'y est aventurée, en laissant la responsabilité aux fabricants de moteurs. Il est certain que, malgré son système de refroidissement intégré, un moteur échauffe l'air qui l'environne et que cet échauffement est néfaste à son rendement. Mais, plus que le volume du compartiment, c'est le renouvellement de cet air qui assurera l'évacuation des calories. Si une ventilation correcte du compartiment est assurée, ce sont donc les conditions d'accessibilité aux différents organes qui dicteront les dimensions du compartiment et surtout les moyens d'assurer cette accessibilité. Il est impératif que celle-ci ne soit pas limitée à la seule face avant, comme on le voit trop souvent, mais aussi aux faces latérales afin de pouvoir vérifier et régler les connexions électriques, les commandes à distance, la pompe d'injection, l'inverseur, le presse-étoupe et permettre les vidanges sans difficulté. Sauf sur les très grands voiliers disposant d'une véritable chambre des machines, cela peut impliquer de prévoir des panneaux mobiles judicieusement placés.

On admet que la consommation d'air frais est de **0,15** à **0,20** m^3 par kW et par minute, dont les **2/5** sont utilisés pour le mélange air-carburant.

Il faudra donc prévoir une ventilation naturelle en rapport avec ce débit. C'est un problème souvent difficile à résoudre compte tenu de l'écoulement aérodynamique qui se produit autour d'un voilier en marche.

Dans tous les cas, on devra avoir une arrivée d'air frais à la partie basse et une évacuation à la partie haute en deux points opposés du compartiment.

Sur un voilier, il est bon de prévoir deux systèmes symétriques de chaque bord. On utilisera des systèmes de boîte Dorade placés sur l'arrière du rouf et/ou dans les hiloires du cockpit.

La section des sorties doit être supérieure à celle des entrées. On peut prendre *a priori* comme surface minimum totale des entrées **0,3** dm^2, mais ici encore on devra se conformer aux spécifications du fabricant de moteurs. Le volume en m^3 du compartiment moteur est le volume net, déduction faite de celui du moteur.

La norme ISO 11105 s'applique uniquement aux moteurs à essence et aux compartiments contenant leurs réservoirs. On peut l'utiliser comme base pour tous les compartiments quel que soit le carburant. Elle détermine la section intérieure totale des conduites par la formule

$\mathbf{A\ cm^2 = 33\ \log^n (V/0{,}14) \geq 30\ cm^2}$ avec

V : volume net en m^3

$\mathbf{Log^n}$: logarithme népérien.

L'orifice d'échappement doit se situer dans le tiers inférieur du compartiment, mais au-dessus du niveau d'accumulation des eaux de cale. Les deux conduits, admission et échappement doivent être écartés, si possible, d'au moins **600** mm.

Pour les moteurs à essence il faut de plus, pour des raisons faciles à comprendre, prévoir une ventilation électrique fonctionnant à l'aspiration, donc placée sur les sorties.

Dans ce cas, le ventilateur sera choisi en fonction du volume net du compartiment moteur et les sections des conduits sont indiquées par le fabricant.

Le débit $\mathbf{F_r}$ ne doit pas être inférieur à celui donné par le tableau ci-dessous.

V m^3	F_r m^3/mn
< 1	1,5
1-3	1,5 V
> 3	1,5 V + 3

Les ventilateurs doivent être conformes à la norme ISO 9097.

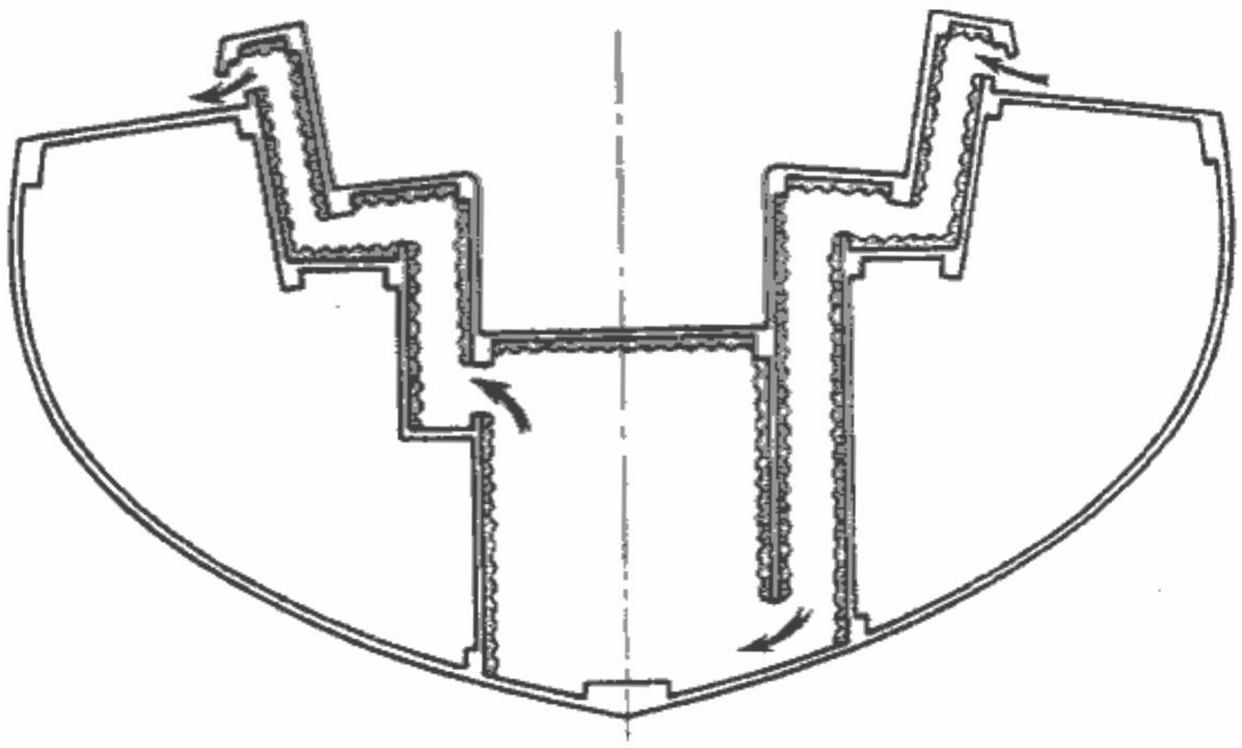


Fig. 10-12 • Aération de compartiment moteur par chicanes insonorisées. À droite, arrivée d'air frais, à gauche, sortie d'air vicié. Le système est symétrique avec les entrées en avant du compartiment et les sorties en arrière. Les aérateurs sont conçus comme des boîtes *Dorade*.

Ne pas oublier que cette ventilation forcée, qui n'est obligatoire qu'avant le démarrage, pour assurer le renouvellement de l'air et éliminer toutes les vapeurs qui pourraient provenir de fuites de carburant, ne supprime pas la ventilation naturelle. Si les conduites d'évacuation sont communes, il faudra veiller à ce que le ventilateur arrêté ne constitue pas un obstacle à la libre circulation de l'air.

Le fond du compartiment moteur doit être équipé d'une gatte destinée à recevoir les écoulements accidentels d'huile ou de carburant. Sa hauteur devra donc être suffisante pour tenir compte d'une certaine gîte.

Sur les coques métalliques ou en stratifié, cette gatte peut être partie intégrante de l'ensemble constitué par le fond, les carlingues et les varangues afin que les épanchements ne puissent se répandre hors du compartiment.

L'isolation phonique du compartiment moteur doit être particulièrement soignée sur un voilier.

Sachant que les bruits sont transmis par les parois et par l'air, on doit assurer la rigidité des premières et l'étanchéité du second. Tous les panneaux amovibles devront donc être munis d'un joint ininterrompu sur tout leur pourtour et d'un système de fermeture assurant la pression de ce joint. Aucune entrée d'air par les emménagements ne doit être admise et l'on devra assurer l'étanchéité des passages des canalisations, de l'échappement, des commandes et des conducteurs électriques par des passe fils ou des traversées de parois en néoprène.

L'isolation des parois s'effectue sur deux plans, réduction de leurs vibrations d'une part, absorption des bruits eux-mêmes d'autre part.

La première est obtenue d'abord par un échantillonnage suffisant des parois — on ne pourra que très difficilement isoler un panneau en contreplaqué de **6** mm — et par un revêtement de peinture ou de matériau à haute densité, généralement du caoutchouc chargé de plomb, collé avec une colle néoprène ou des complexes à base de feutre bitumeux autocollant (*Blackisol*).

L'absorption du bruit est obtenue par un second revêtement en mousse de polyester gaufrée ou alvéolée de **4** à **6** cm d'épaisseur, collée sur le premier revêtement. Toutes les parois, sauf le fond bien sûr, doivent subir ce traitement, y compris les conduits de ventilation. Ceux-ci devront de plus comporter un système de chicane sans restriction de section (FIGURE **10-12**).

Bien sûr, les matériaux utilisés doivent résister aux hydrocarbures et ne pas propager la flamme.

Le fond du compartiment sera traité uniquement pour la réduction des vibrations par l'application du revêtement haute densité afin d'éviter la transmission de celles-ci à la coque elle-même. Une isolation semblable peut être prévue au-dessus de l'hélice pour la même raison.

Lorsqu'il n'y a pas d'installation fixe d'extinction, ce qui est généralement le cas pour les diesels, sauf dans les puissances élevées, il faudra prévoir un orifice sur la paroi la plus facilement accessible par lequel on pourra passer la buse d'un extincteur. Cet orifice sera normalement obturé par un volet ou un diaphragme perforable.

3 COMMANDES DU MOTEUR

Les commandes du moteur se présentent sous forme de deux éléments : le tableau de bord avec le contact de démarrage, les voyants et cadrans de contrôle d'une part, le boîtier de commande d'accélérateur et d'inverseur d'autre part.

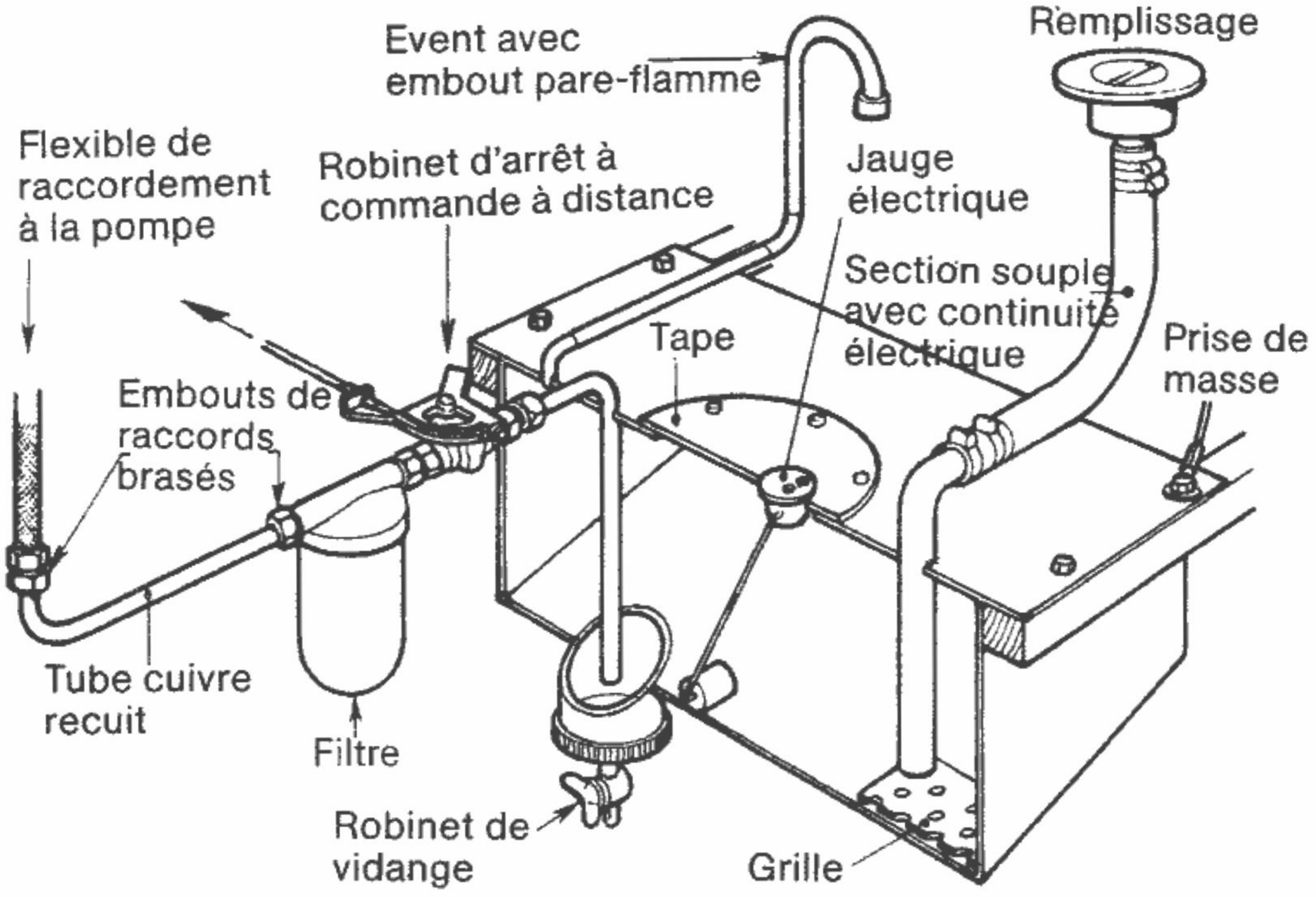


Fig. 10-13 • Ensemble du circuit d'alimentation et de remplissage du réservoir.

Le tableau de bord comportant essentiellement des accessoires électriques est, de ce fait, très sensible à l'atmosphère marine. C'est pourquoi on le place souvent à l'intérieur de la cabine. Si cette solution est excellente pour sa protection, elle est en revanche très dangereuse sur le plan de la sécurité car le barreur ne peut pas surveiller directement les indicateurs, ni intervenir sur la clé de contact sans lâcher la barre. En revanche, il est tout aussi mauvais de placer le tableau dans le baquet du cockpit où il peut être noyé par la première vague qui l'envahit et où il n'est pas à l'abri d'un coup de pied. Une bonne solution est de le monter dans un logement ménagé dans l'hiloire arrière du cockpit et fermé par un volet d'*Altuglass*, les contrôles peuvent s'effectuer volet fermé, la clé est immédiatement accessible et le tableau est protégé.

La plupart des commandes du moteur, gaz et inverseur, s'effectuent par des commandes par câble tire-pousse (push-pull) type Morse, Ultraflex, Flexatrol ou autres. On trouve une multitude de boîtiers de commande à leviers séparés ou mono levier combinant gaz et inverseur.

Quelques précautions sont à prendre pour leur installation. En premier, les rayons de courbure doivent être aussi grands que possible, prendre au moins le double du minimum conseillé par le fabricant pour avoir un fonctionnement « en souplesse ». Il est généralement prévu sur le moteur lui-même un point d'ancrage pour la gaine, vérifier sa rigidité. Éviter enfin que la gaine vienne à proximité d'une source de chaleur, collecteur d'échappement par exemple. Elle sera tenue en des points suffisamment rapprochés, en particulier aux traversées des parois où l'on devra éviter tout risque d'usure par frottement.

Le boîtier de commande sera placé à portée de main (ou de pied) du barreur. Il est important que celui-ci puisse le commander debout lors des manœuvres de mouillage.

Sur un grand voilier, il est possible de réunir le tableau et le boîtier de commande sur la console portant la barre à roue. Mais attention ! ils ne font pas souvent bon ménage avec le compas.

4 ALIMENTATION EN CARBURANT

Celle-ci se divise en trois éléments : le circuit de remplissage du moteur, le réservoir, le circuit d'alimentation proprement dit.

Quel que soit le type de carburant, essence ou gazole, ces éléments comportent des points communs. Tout d'abord, il est préférable que toutes les parties métalliques soient réali-

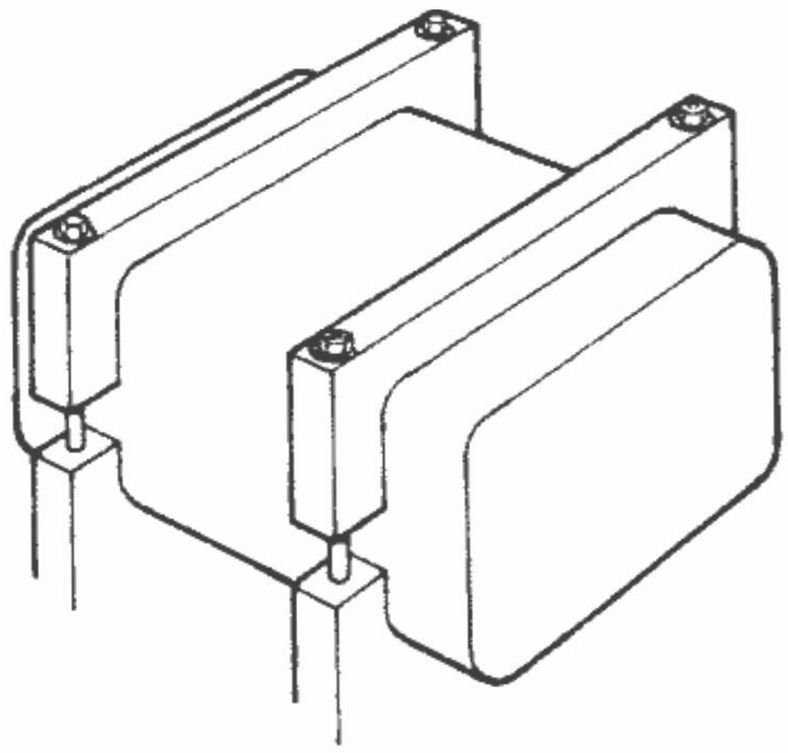


Fig. 10-14 • Fixation d'un réservoir sur bâti.

sées dans le même métal pour éviter tout risque de corrosion. Les matériaux à utiliser ne doivent pas présenter d'effet catalytique provoquant l'oxydation du carburant.

Pour le gazole, on peut donc utiliser l'acier, l'acier plombé, l'acier inoxydable, l'alliage léger, le stratifié verre-résine, le polyéthylène, mais en aucun cas le cuivre et l'acier galvanisé. La galvanisation peut bien sûr être conservée pour l'extérieur.

Pour l'essence, les matériaux possibles sont l'acier plombé ou galvanisé, l'acier inoxydable, l'alliage léger, le cuivre étamé, les alliages de cupronickel, le stratifié verre-résine.

Les assemblages doivent toujours être soudés ou brasés. Les soudures à bas point de fusion (étain) sont interdites.

Dans tous les cas, même lorsqu'il y a des sections souples, la continuité électrique doit être assurée depuis le bouchon de remplissage jusqu'au moteur et l'ensemble doit être mis à la masse (FIGURE **10-13**). Dans le cas des réservoirs en stratifié, toutes les prises métalliques doivent être reliées entre elles et à la masse.

La norme prévoit un essai de mise en pression pour vérifier l'étanchéité de l'ensemble du circuit. Il est indispensable de faire subir cet essai au réservoir lors de sa réception chez le fabricant pour s'assurer de sa parfaite étanchéité.

Il ne doit y avoir aucune contre-pente dans les circuits de remplissage, d'alimentation ou de dégagement d'air.

Toutes les sections souples doivent être faites d'un matériau résistant aux hydrocarbures répondant à la norme ISO 7840 type A1 ou A2 si elles sont situées dans le compartiment moteur ou ISO 8469 type B1 ou B2, en dehors de celui-ci, et fixées convenablement avec des raccords à vis ou deux colliers et des emmanchements suffisamment longs sur les parties rigides. Elles doivent être toujours accessibles pour contrôle.

L'étanchéité des orifices de remplissage au niveau du pont doit être assurée. Le diamètre des orifices et conduits ne doit pas être inférieur à **38** mm.

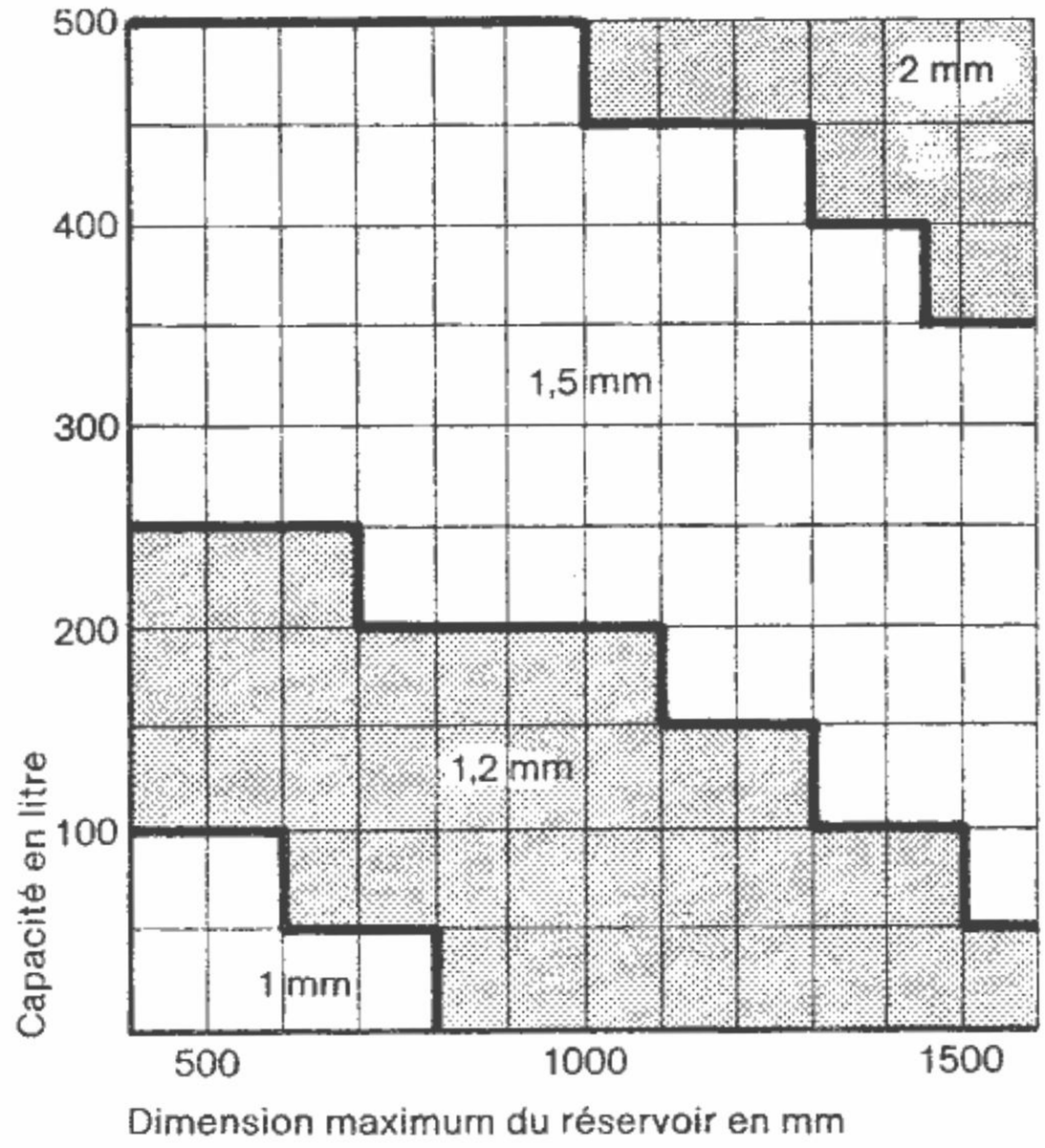


Fig. 10-15 • Épaisseur de tôle de réservoirs en acier inoxydable.

Le tuyau d'arrivée de carburant descendra jusqu'à **5** ou **6** cm du fond et celui-ci sera renforcé à cet endroit par une grille ou une plaque soudée.

Il doit y avoir au départ une section rectiligne d'au moins 15 cm pour recevoir l'embout du tuyau de la pompe.

Les réservoirs doivent toujours être placés dans un compartiment permettant une large circulation d'air autour des parois et un contrôle de leur étanchéité (démontage facile indispensable). Dans une coque métallique, néanmoins, ils peuvent être intégrés à la structure.

Un réservoir d'essence doit toujours être placé dans un compartiment aéré isolé de celui du moteur.

Un bon réservoir doit présenter certaines caractéristiques. Il doit bien sûr être solide et pourvu de cloisons antiroulis, mais surtout sa fixation doit être de préférence intégrée à la construction sous forme de brides qui seront boulonnées avec interposition de rondelles isolantes sur un châssis solidaire de la coque. Il ne faut pas oublier en effet que la masse du carburant est souvent assez grande et surtout que sa mobilité lui permet d'être soumise à des accélérations qui augmentent considérablement les contraintes sur les fixations.

Un réservoir sans bride de fixation peut être tenu sur un chantier découpé en forme avec des brides serrées par des tirants ; interposer une bande de plastique isolant entre le métal du réservoir et le bois des supports (FIGURE **10-14**).

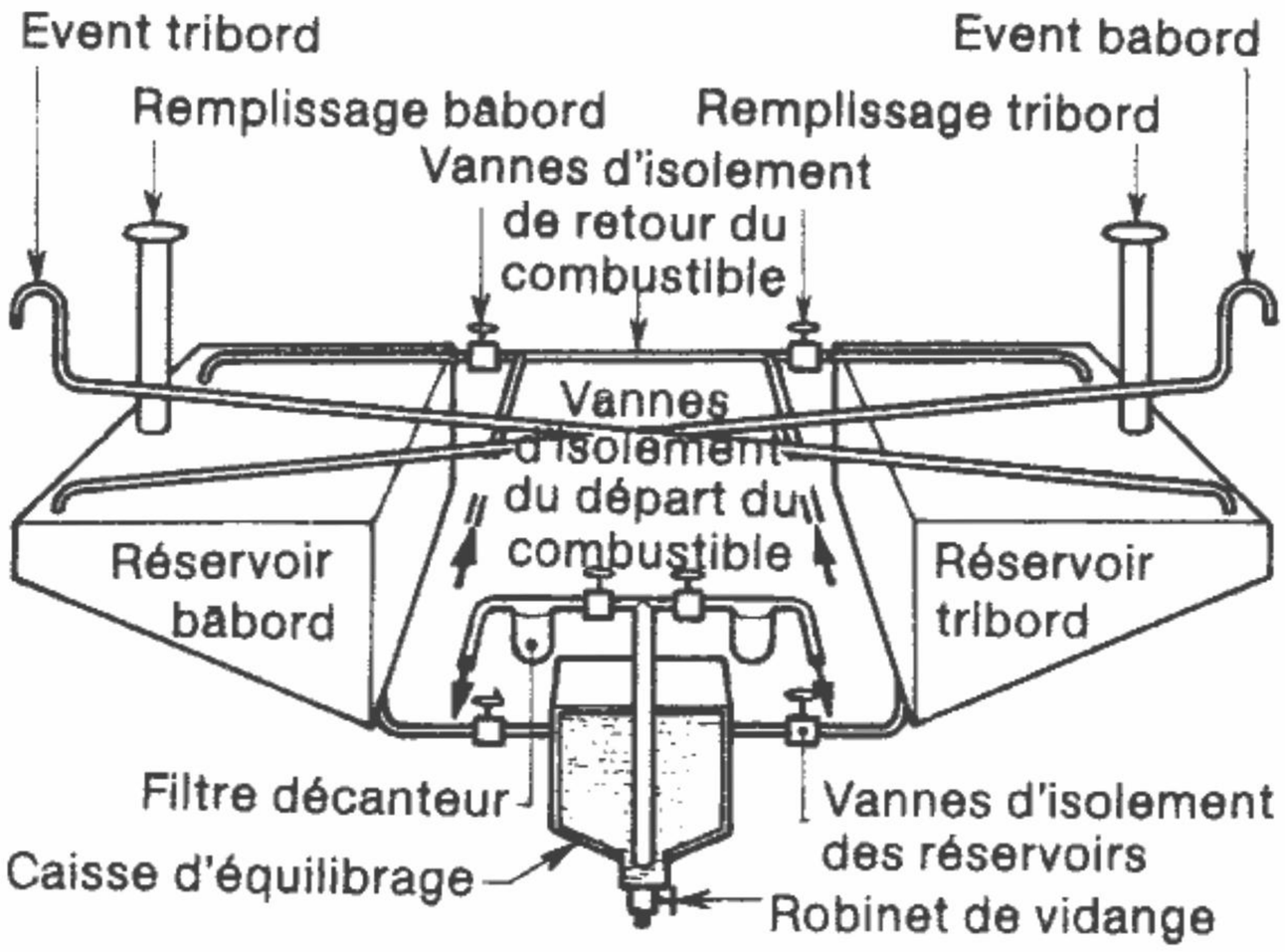


Fig. 10-16 • Schéma, vu côté moteur, d'une alimentation de deux moteurs diesel à partir de deux réservoirs. Le montage serait identique avec un seul moteur. La prise de carburant se fait sur une petite caisse d'équilibrage placée plus bas que les réservoirs. Seules les vannes d'isolement des réservoirs doivent obligatoirement être immédiatement accessibles. Les autres restent normalement ouvertes et ne sont utilisées que pour isoler un moteur ou un réservoir. Tous les raccords sur le dessus des réservoirs (remplissage, évent, retour) doivent être placés le plus en abord possible. Les évents sont croisés et les sorties de réservoirs sont à l'arrière, alors que les retours sont à l'avant.

Quel que soit son mode de fixation, le dessous du réservoir doit être supporté car son fond ne présente généralement pas une résistance suffisante. Les réservoirs cylindriques possèdent sur ce point un net avantage.

La FIGURE **10-15** donne les épaisseurs d'acier inoxydable en fonction de la capacité.

Le réservoir doit toujours être muni sur le dessus d'une tape solide et étanche, suffisamment grande pour permettre d'en effectuer aisément l'inspection et le nettoyage.

Certains préconisent la fixation sur cette tape de toutes les prises. C'est bien sûr une facilité pour la fabrication et le contrôle de leur soudure, mais cela ne permet pas de les disposer aux emplacements les plus favorables et représente une gêne considérable lorsqu'on désire ouvrir cette tape.

Seule la jauge électrique doit être montée sur celle-ci.

L'évent du réservoir doit avoir un diamètre de **16** mm minimum, on a tout intérêt à mettre plus car la grille de protection pare-flamme placée sur l'orifice réduit considérablement le débit d'air et, avec une pompe à carburant normale, on a toujours des refoulements. Un petit col-de-cygne placé plus haut que l'orifice de remplissage, empêchera les entrées d'eau. Ne pas oublier que la sortie de ce dégagement d'air doit être placée à proximité de l'orifice de remplissage pour pouvoir être surveillée par la personne effectuant cette opération. Elles ne devront pas se trouver à moins de **400** mm, ou à la verticale d'une ouverture d'aération communicant avec l'intérieur du navire. La prise d'air sur le réservoir doit être située au point le plus haut de celui-ci et en tout cas sur le bord opposé à celui de l'orifice extérieur pour qu'en cas de coup de gîte brutal le carburant ne puisse se déverser par l'évent. Ceci est particulièrement important sur les voiliers équipés de réservoirs placés en abord, les conduits de dégagement d'air doivent alors être croisés (FIGURE **10-16**).

Peu de moteurs sont encore alimentés par gravité sans pompe d'alimentation. La prise de carburant s'effectuera donc par le dessus, ce qui est plus pratique pour la surveillance et permet théoriquement de se passer du robinet d'arrêt.

Dans tous les cas, il faudra s'assurer cependant qu'il n'y a pas de risque de siphonnage, c'est-à-dire qu'aucun raccord (section souple, pompe, etc.) où pourrait se produire une fuite ne devra être situé plus bas que l'extrémité inférieure du tube de piquage. Malgré ces précautions, la présence

d'un robinet d'arrêt reste une bonne sécurité et les systèmes de commande à distance sont assez nombreux pour que sa manœuvre ne présente pas de difficulté.

La norme prévoit pour cela l'utilisation d'une valve antisiphon ou d'une vanne à commande électrique qui ne s'ouvre que lorsque le moteur est en marche. La pratique montre que ces deux solutions, chères aux Américains, sont aussi mauvaises l'une que l'autre. La première parce que la moindre impureté coincée dans la valve la rend inopérante, la seconde parce que la première coupure dans le circuit électrique oblige à maintenir la vanne ouverte manuellement !

Le tuyau de piquage du carburant descendra dans une petite cuvette placée au point le plus bas du réservoir, afin de ne pas perdre de la hauteur disponible. Pour le gazole cependant, il est préférable que ce tuyau ne descende pas à moins de **5%** de la hauteur minimum de carburant admise dans le réservoir pour être sûr de ne pas aspirer la part de carburant qui peut être contaminée par de l'eau (condensation). A ce sujet, il est bon de rappeler qu'il est toujours préférable de maintenir les réservoirs pleins. Le fond de cette cuvette sera amovible pour pouvoir éliminer les boues qui ne manqueront pas de s'y déposer. Il sera pourvu d'un robinet de vidange. L'accès au-dessous du réservoir est indispensable.

De courtes sections souples seront placées sur toutes les prises ou arrivées au réservoir pour éviter des contraintes anormales sur leurs soudures par suite des vibrations ou des déformations de la coque, ainsi que sur tous les raccords avec le moteur. Ne pas oublier la continuité électrique.

Un support adéquat doit soutenir la partie rigide du conduit à moins de **100** mm du raccord.

L'idéal pour ces sections souples est qu'elles soient munies d'embouts sertis vissables, mais le montage par colliers en acier inox à serrage positif est autorisé. Pour les tuyaux souples de moins de **25** mm de diamètre nominal, un seul collier de **8** mm de large est prévu et l'embout cylindrique sur lequel il s'encastre doit être d'au moins **25** mm. Au-dessus de **25** mm, il faut deux colliers de **10** mm et un embout de **35** mm.

Personnellement, je préconise cette deuxième solution quel que soit le diamètre, ainsi que l'interposition entre le collier et le tuyau d'une bande de protection, comme pour les canalisations de gaz et d'eau.

La norme prévoit un essai de résistance au feu et à la pression. Si les conditions de ces essais sont valables pour des éléments individuels du commerce, elles ne peuvent l'être pour l'essai au feu de l'ensemble complet pour des navires ou des éléments de navires construits à l'unité, tels que les réservoirs. Seuls les essais de pression sont réalisables. Ceux-ci s'effectuent sous une pression de **2** bars pendant **1,5** sec par litre de capacité du réservoir avec un minimum de **5** mn et un maximum de **30** mn. Ces sections souples doivent être d'un type conforme à la norme ISO 7840 type A1 pour l'essence, A1 ou A2 pour le diesel. Un pré-filtre est généralement fourni avec le moteur mais, pour le gazole surtout, il sera bon de prévoir un filtre avec séparateur d'eau immédiatement à la sortie du réservoir. Il est bon que la cuve de décantation soit transparente pour permettre un contrôle, mais elle doit être incassable et munie d'un système de by-pass pour pouvoir être démontée en marche. Il faudra prévoir une gatte en dessous pour recueillir les égouttures lors du démontage.

Le circuit de retour du gazole venant de la pompe d'injection aboutira sur un tuyau plongeant dans le réservoir **1** ou **2** cm plus bas que la prise d'alimentation et suffisamment loin pour que le carburant de retour chaud ait le temps de se refroidir avant d'être aspiré à nouveau. Au bout de quelques temps de marche, ce gazole de retour réchauffe le carburant du réservoir qui se dilate et risque de refouler par l'évent, s'il est trop plein.

Tous les raccords sur le circuit d'alimentation doivent être vissés avec un joint adéquat capable de résister à une pression de **7** bars.

Sauf sur les coques en alliage léger, les canalisations fixes seront en cuivre rouge recuit, ce qui permet de réaliser facilement des raccords avec collets battus ou en alliage de cupronickel. L'épaisseur ne sera pas inférieure à **0,8** mm. L'alliage léger est autorisé pour le diesel. Elles seront supportées tous les **50** cm environ par un collier.

5 CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT

La plupart des moteurs ont un refroidissement direct ou indirect par eau de mer. Les refroidissements par eau douce en circuit fermé avec radiateur sous la coque sont en effet fort rares, surtout sur les voiliers.

La prise d'eau de mer s'effectue en général par un passe-coque avec crépine équipé d'une vanne d'arrêt. Cette vanne, comme toutes celles utilisées sur le bateau pour les vidanges du cockpit, des w.-c. et toutes les prises d'eau, sera du type à boisseau quart de tour avec manœuvre par levier. Les vannes à opercule sont en effet trop longues à manœuvrer. Un filtre sera placé après la vanne pour éviter toute obstruction du circuit par les saletés qui auraient traversé la crépine.

Sur un bateau de croisière, les prises d'eau, et par conséquent les passe-coque et les vannes sont nombreux, avec tous les risques que cela comporte. C'est pourquoi, il est préférable dans ce cas de prévoir une véritable centrale à eau de mer. Il s'agit d'un filtre, de dimensions généreuses, comportant une entrée et plusieurs sorties. La section de l'entrée doit être en rapport avec le débit maximum à assurer, elle est munie d'une vanne quart de tour placée le plus bas et le plus au centre

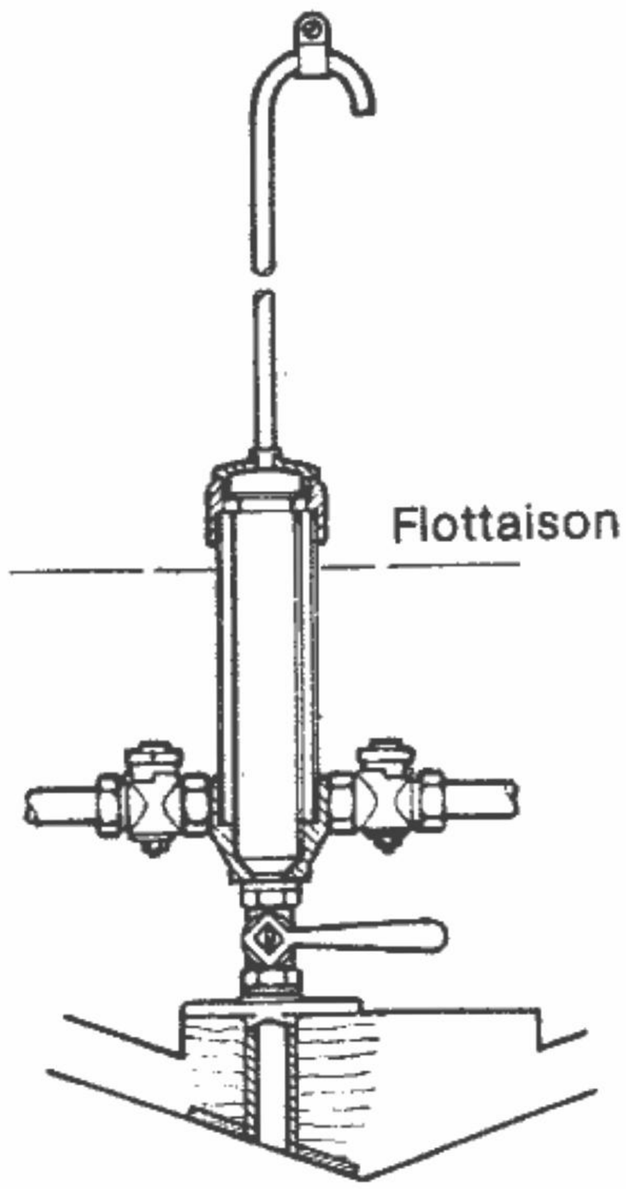


Fig. 10-17 • Centrale à eau de mer combinant, sur une seule prise d'eau, un filtre et plusieurs sorties, chacune munie d'une vanne. Le bouchon supérieur doit être au-dessus de la flottaison pour pouvoir changer le filtre en marche sans être obligé de fermer la vanne. Faire attention que l'évent ne débouche pas au-dessus de pièces mécaniques ou électriques. On peut aussi prévoir une cuvette de récupération pour les gouttes d'eau qui viendraient à s'échapper. L'évent étant destiné à évacuer les poches d'air qui pourraient se former dans le filtre, la valve empêche le retour d'air.

possible de la carène, pour éviter toute émersion à la gîte ou au tangage. Les sorties sont également pourvues d'une vanne permettant d'isoler chacun des circuits, par exemple : refroidissement moteur, évier, w.-c., etc. (FIGURE **10-17**).

Le filtre, dont le couvercle sera placé au-dessus de la flottaison, sera pourvu d'un évent montant le plus haut possible, muni d'une valve empêchant l'entrée de l'air et débouchant à l'extérieur, pour éviter tout blocage par une poche d'air.

Les tuyautages souples en plastique doivent être d'un type renforcé, de préférence annelés, pour résister à tout écrasement soit dans un coude, soit sous l'effet de la dépression de la pompe.

6 ÉCHAPPEMENT

Les échappements sont de type « sec » ou « humide ». Le type sec n'est guère utilisé que sur de petits canots de pêche-promenade. Dans ce cas, le conduit sera aussi court et direct que possible. Il sera réalisé en matériau incorrodable (acier inoxydable) avec une section souple métallique à la sortie du collecteur et revêtu d'un isolant ignifuge. Il ne doit jamais venir au contact direct avec un élément quelconque des emménagements ou de la coque, sa sortie en particulier doit être isolée du bordé (FIGURE **10-18**).

Ce type de montage n'est bien sûr valable que si le collecteur est largement au-dessus de la flottaison.

L'échappement humide reçoit en totalité, ou en partie, l'eau de refroidissement. Le point d'injection de celle-ci devra se trouver aussi près que possible de la sortie du collecteur, mais au moins à **10** cm en dessous de celui-ci, s'il n'est pas prévu d'origine sur le moteur.

Sur les voiliers, le moteur étant presque toujours situé trop bas pour pouvoir installer un échappement direct, le conduit d'échappement devra être pourvu en son point haut d'une valve ou d'une prise d'air, pour éviter que la vanne de prise d'eau étant restée ouverte, une fuite dans le rotor de la pompe permette à l'eau de refroidissement de siphonner et de remonter dans le collecteur et les cylindres (FIGURE **10-19**).

Les bruits d'échappement étant responsables d'une grande part des nuisances du moteur, l'ensemble de la ligne d'échappement doit être conçu pour réduire ceux-ci au minimum.

Pour cela, on utilisera de préférence des éléments en plastique ou en néoprène d'une qualité compatible avec le mélange gaz-eau salé.

Les tuyaux en néoprène n'acceptant cependant pas les coudes de faible rayon, ceux-ci sont constitués d'éléments rapportés, eux-mêmes en néoprène, en plastique moulé ou en acier inoxydable, le tout assemblé par double collier de serrage.

Le diamètre intérieur de tous les éléments constituant la ligne d'échappement sera au moins égal à celui du collecteur d'échappement, et supérieur si la longueur excède celle prévue par le fabricant, ou s'il y a des coudes nombreux.

Dans le cas où le collecteur se trouve à moins de **25** cm au-dessus de la flottaison, aussitôt après le point d'injection d'eau, mais au moins à **30** cm de celui-ci et le plus bas possible dans la coque, on placera un pot à barbotage ou *waterlock*.

Si sur les puissances moyennes ce pot peut être en plastique, il sera en acier inoxydable sur les puissances élevées.

Dans ce cas, on veillera à ce que la base du pot ne se trouve pas placée dans une eau stagnante et on pourra envisager de l'insonoriser en le recouvrant d'une peinture et d'un

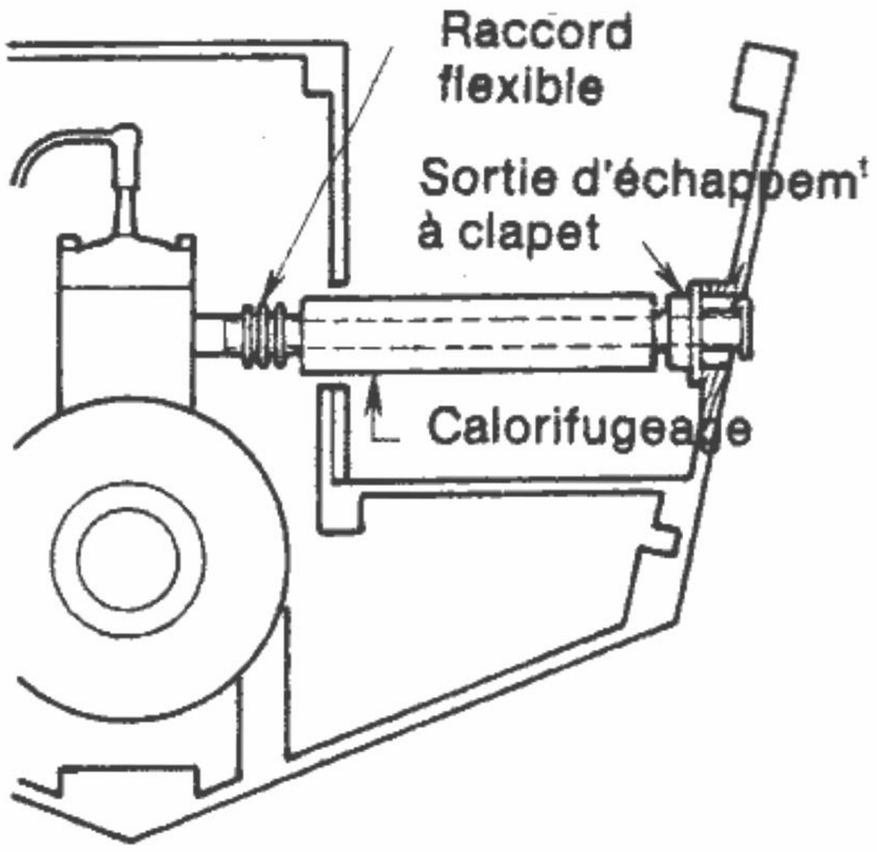


Fig. 10-18 • Échappement sec direct pour petit canot. On peut placer un col-de-cygne en sortie d'échappement, mais celui-ci doit être également calorifugé et muni d'un purgeur au point bas.

matériau absorbant. Son volume doit être supérieur à celui des canalisations afin qu'à l'arrêt, l'eau se trouvant dans celles-ci puisse s'y rassembler. Étant placé au point le plus bas de la ligne, le pot devra être muni d'un robinet pour permettre la vidange du circuit pendant l'hivernage ou s'il vient à se remplir lors d'ennuis de démarrage.

On peut encore atténuer le bruit en plaçant à la sortie un silencieux en néoprène.

La sortie d'échappement se fera par un col-de-cygne pour empêcher les entrées d'eau lorsque l'orifice est submergé. La hauteur maximum entre le *waterlock* et le haut du col-de-cygne est limitée par la contre-pression que peut admettre l'échappement sans trop de perte de puissance. Cette valeur est indiquée par le fabricant du moteur.

Le col-de-cygne peut être remplacé par un autre *waterlock* en métal ou en plastique.

On peut bien sûr prévoir une vanne sur la sortie d'échappement. Ceci est même à conseiller pour les voiliers devant effectuer de grandes traversées à la voile par mer de l'arrière, mais attention de ne pas oublier de l'ouvrir avant de faire démarrer le moteur.

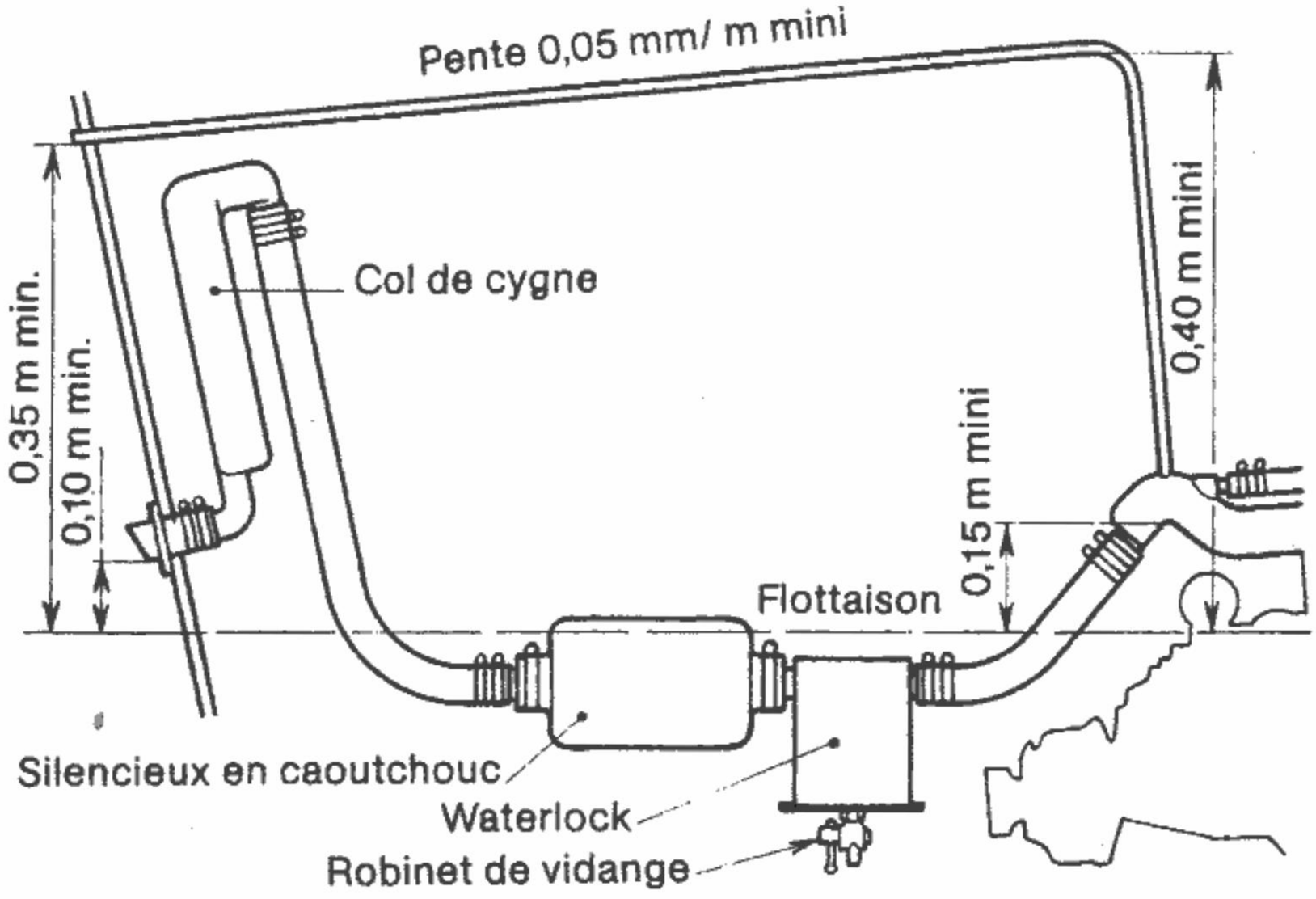


Fig. 10-19 • Échappement humide avec waterlock pour moteur au-dessous de la flottaison. Le pot d'échappement sur le moteur est généralement équipé d'un évent au point haut pour éviter tout risque de siphonnage. Cet évent doit être amené jusqu'au tableau.

Tous les éléments métalliques de la ligne d'échappement qui doivent être fixés à la coque, le seront par l'intermédiaire de petits silentblocs ou de passe-fils en néoprène pour éviter la transmission des vibrations. De même, on utilisera une sortie d'échappement en néoprène.

La ligne d'échappement devra toujours être aussi courte que possible mais, si des points de fixation intermédiaires sont nécessaires, on utilisera pour cela les sections de raccordement ou les coudes en acier inoxydable assurant les liaisons entre les pots et les canalisations. Ils seront fixés par des colliers avec interposition d'une bande de néoprène souple. Pour les passages de cloison, on utilisera des brides en néoprène analogues à celles des sorties d'échappement.

Il est difficile de trouver un emplacement correct pour la sortie d'échappement. Sur le côté, elle risque d'être trop facilement noyée à la gîte sur un voilier. Sous la voûte, des contre-pressions élevées peuvent se développer au tangage. Il ne reste donc guère que la sortie dans le tableau où malheureusement il y a toujours une zone d'air mort dans laquelle stagnent les gaz. On la placera le plus bas et le plus au centre du tableau. Elle devra se trouver à **15** cm au moins au-dessus de la flottaison.

7 LIGNE D'ARBRE

Comme nous l'avons vu plus haut, la ligne d'arbre pourra être du type rigide ou souple.

Dans le premier cas, elle sera généralement associée à une hélice en cage. Les dimensions minimums de celle-ci sont définies par le diamètre de l'hélice et ses possibilités de démontage (FIGURE **10-20**).

À l'arrière, une place suffisante doit être prévue pour le passage d'un arrache moyeu.

La cage peut être totalement intégrée à l'aileron, tangenter la mèche ou être partiellement découpée dans le safran. Ce dernier montage a l'avantage de permettre, en orientant celui-ci, de dégager le moyeu de l'hélice et le passage de l'arbre qui peut alors être démonté sans avoir à enlever le safran.

Cette disposition présente en revanche l'inconvénient de réduire l'efficacité du safran dans les manœuvres latérales par à-coups avant-arrière. Une autre solution consiste à décentrer l'axe du moteur ou à lui donner en plan un angle par rapport à l'axe de la carène. L'arbre peut ainsi passer sur le côté de la mèche et, de plus, il est possible de compenser l'effet giratoire de l'hélice. Pour cela, le moteur sera décalé sur tribord si elle tourne à gauche en regardant vers l'avant et, inversement, si elle tourne à droite.

Avec une ligne d'arbre souple, l'hélice peut être en cage mais, le plus souvent, elle sera libre et soutenue par une

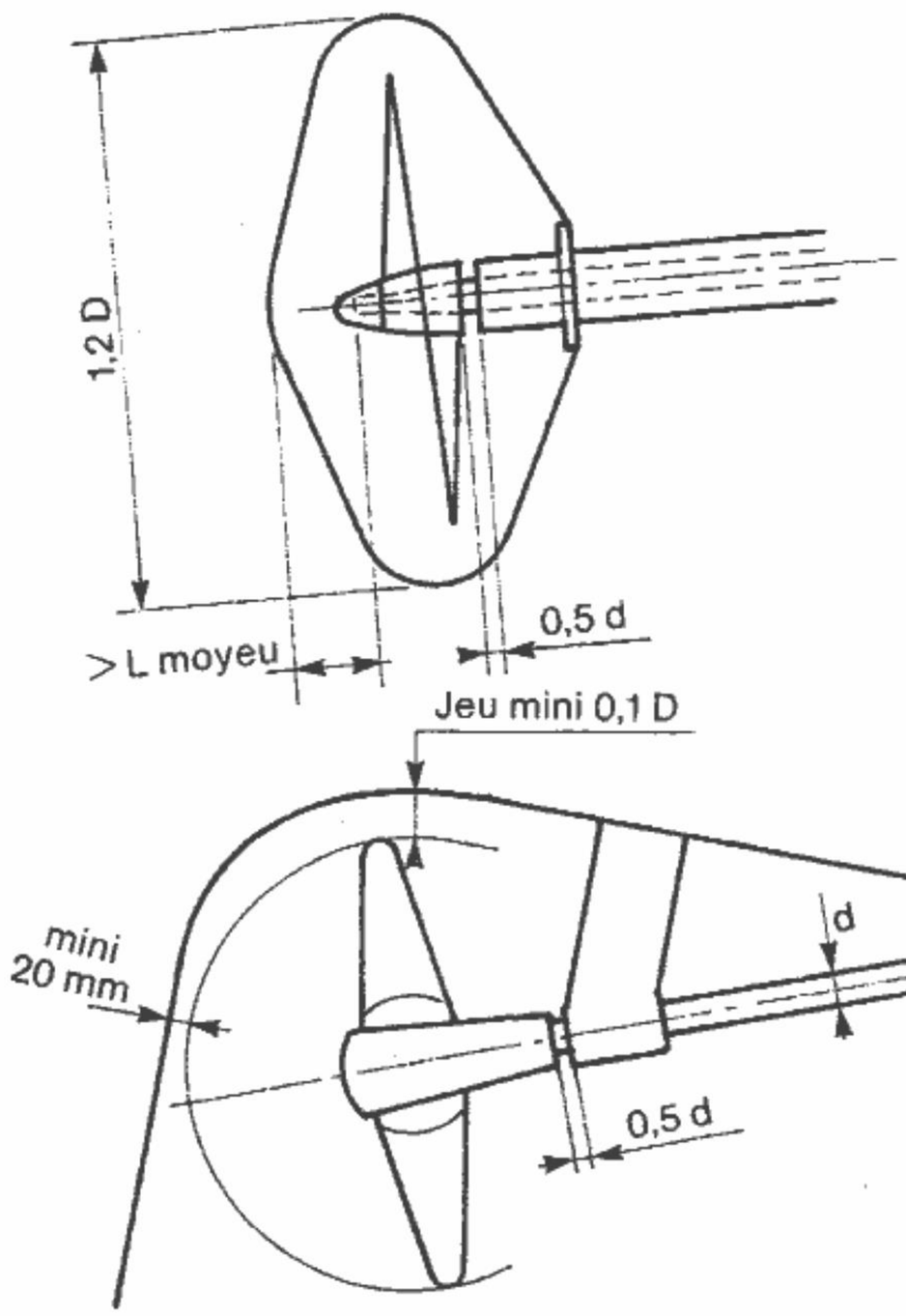


Fig. 10-20 • Jeu à prévoir autour des hélices dans le cas d'une cage fermée (en haut) ou d'une hélice à pales repliables sur chaise (en bas).

chaise. La fixation de celle-ci doit être extrêmement rigide pour réduire les vibrations, elle devra être reprise à l'intérieur de la coque sur une varangue ou tout autre élément de structure transversale. Elle peut en effet subir des efforts importants lorsqu'un bout se prend dans l'hélice et la bloque.

Comme pour l'hélice en cage, il faudra penser au démontage de l'hélice et de l'arbre qui devra obligatoirement être décalé dans le cas où le gouvernail comporte un aileron fixe.

Le jeu de l'hélice avec le fond de la coque dépendra de la forme des sections à son niveau. De 10 % du diamètre pour un fond relativement en V, il atteindra 15 % pour un fond plat.

On évitera les bossages porte-étambot que l'on voit souvent sur les voiliers en stratifié à la place des chaises. S'ils ont l'avantage de la solidité, ils ont, par contre, deux graves inconvénients : leur largeur, nécessaire au moulage, qui per-

turbe considérablement le passage de la veine d'eau, et leur dissymétrie verticale entraînant des vibrations importantes. Si l'hélice ne peut être placée dans une cage fermée et que la puissance est importante, il est préférable de monter une chaise à deux branches.

Le presse-étoupe est un élément très important de la ligne d'arbre. Il doit être constamment lubrifié soit par l'eau provenant de l'étambot ou d'un circuit annexe, soit par graissage. Sa fixation à la coque doit être suffisamment robuste pour résister à un blocage de l'arbre par grippage, et l'on ne reviendra pas sur son accessibilité.

On trouve également des systèmes d'étanchéité par joint tournant. Ceux-ci fonctionnent correctement et ont l'avantage de demander théoriquement moins de surveillance qu'un presse-étoupe classique... tant qu'une petite saleté ne se glisse pas sur la portée ou que des vibrations importantes ne provoquent un décollement du joint.

E ▪ ESSAIS DE MARCHE AU MOTEUR

Trop rarement, l'architecte peut procéder à une vérification de ses calculs par des essais systématiques. Ils sont pourtant indispensables pour affiner les réglages du moteur et le choix de l'hélice, et établir avec précision la courbe de consommation.

Car il ne faut pas se faire d'illusions, les caractéristiques des voiliers sont trop variables et les évaluations des pertes aux différents niveaux de l'installation trop imprécises, sans parler des données du moteur, pour assurer un résultat absolu des calculs.

Pour réaliser ces essais, il faut disposer d'un minimum de matériel :

- un compte-tours sur le tableau de bord que l'on aura fait étalonner par le motoriste ;
- une éprouvette graduée en plastique de **1** litre environ à la base de laquelle on fixera une vanne à **3** voies, le tout monté sur une planchette permettant de la fixer à une paroi. Plus le diamètre de l'éprouvette sera réduit, plus la mesure sera précise (FIGURE **10-21**) ;
- un chronomètre.

Le plus difficile est de définir une base de vitesse, l'idéal étant de pouvoir utiliser deux marques fixes, balises ou amers à terre (pas des bouées à cause du courant qui les déplace) dont on connaît la distance **D** exacte et le relèvement de leur alignement. Ce dernier peut être mesuré sur la carte ou mieux, relevé sur le compas du bateau s'il est possible de se placer sur cet alignement, cela permet d'éviter toute correction. Bien sûr, il faudra choisir un lieu, estuaire

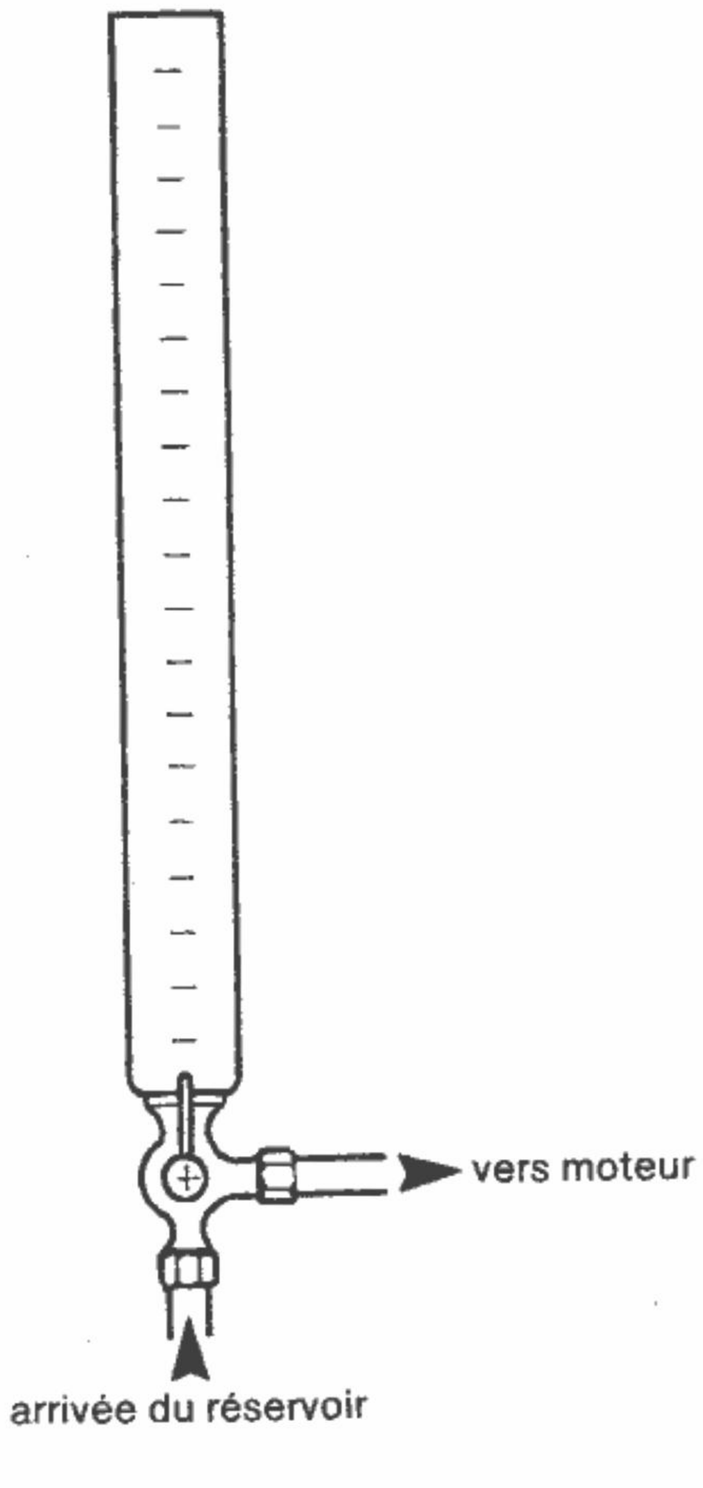


Fig. 10-21 • Éprouvette graduée avec vanne trois voies pour mesures de consommation.

ou rivière par exemple, où le courant sera toujours parallèle à la route.

Pendant les essais, on suivra une route parallèle aux amers retenus. Si la route ne peut être parallèle, il suffira de considérer la distance comme égale à **D sin e**, **e** étant l'écart en degrés par rapport à la route parallèle.

Pour repérer exactement le passage des amers, on prendra sur le pont un alignement perpendiculaire à l'axe tel que deux haubans ou deux winches par exemple.

Avant de procéder aux essais, on intercalera la vanne de l'éprouvette au niveau d'un raccord de l'alimentation. Si le retour de gazole se fait directement vers le réservoir, le débrancher et le ramener sur un raccord en aval de la vanne de l'éprouvette. Attention à ne pas se tromper dans le branchement ! Purger le circuit et faire tourner le moteur en charge pour l'amener à sa température normale.

On choisira par ailleurs un jour sans vent et une eau calme afin de ne pas fausser les essais par des éléments extérieurs et on notera les conditions de charge du voilier (remplissage des réservoirs, nombre de personnes à bord, etc.).

On prendra le cap à une distance suffisante de la première marque afin que le régime du moteur, la vitesse et le cap soient parfaitement stabilisés. À l'instant du passage de la première marque, on déclenche le chronomètre et on tourne la vanne de l'éprouvette pour faire passer l'alimentation sur celle-ci. Au passage de la deuxième marque, on arrête le chronomètre et on repasse l'alimentation sur le réservoir. On note le temps, la consommation et le régime du moteur. Pendant ce temps, le barreur, sans changer le régime du moteur, décrit une large boucle pour revenir sur la route opposée, toujours à distance suffisante, et l'on renouvelle les mesures. Il est bon de faire au moins deux allers et retours pour obtenir un résultat valable, toujours sans changer le réglage du moteur.

La vitesse du bateau pour chaque aller et retour est donnée par la formule : $\mathbf{V = 2D/ (t_a + t_r)}$

V : vitesse en nœuds ;
D : distance en milles ;
$\mathbf{t_a}$: temps mis à l'aller en heures décimales ;
$\mathbf{t_r}$: temps mis au retour en heures décimales.

On moyenne ensuite les vitesses calculées pour chaque aller et retour. La consommation horaire sera donnée par :

$$C_{l/h} = \frac{C_a + C_r}{ta + tr}$$

c'est-à-dire le quotient du total des consommations aller et retour par la somme des temps aller et retour.

Les mesures seront effectuées pour tous les régimes depuis le ralenti, jusqu'au maximum avec des écarts de **100** ou **200** t/mn.

1 ÉTUDE DES RÉSULTATS

Avant toute chose, on sera amené à faire une constatation : le moteur atteint ou n'atteint pas son régime maximum. Dans le second cas, on peut conclure tout de suite que le pas de l'hélice est trop fort et l'on devra refaire les essais avec une hélice de pas plus faible.

C'est par l'étude du recul de l'hélice que l'on pourra connaître le nouveau pas. Connaissant le pas de l'hélice actuelle, son régime (nombre de tours mesurés sur le moteur divisé par le rapport du réducteur) et la vitesse du voilier, on peut calculer le recul apparent (VOIR PAGE 195).

Normalement, celui-ci sera supérieur au recul apparent calculé et le nouveau pas de l'hélice devra être dans le rapport du recul théorique et du recul réel.

Pour l'hélice que nous avons calculée, le pas est de **0,37** m, au régime maximum de **3 300** t/mn soit :
3 300/2,7 = 1 222 t/mn à l'hélice,
la vitesse théorique de l'hélice sera :
$\mathbf{V_t = 0,37 \times 1\ 222/30,8 = 14,68}$ nœuds et
pour une vitesse de **7,2** nœuds le recul apparent théorique sera **(14,68 - 7,2) x 100/14,68 = 51 %**.

Si le voilier n'a atteint que **7** nœuds parce que le moteur n'a pas pu atteindre son régime, le recul apparent mesuré sera **(14,68 - 7) x 100/14,68 = 52,3 %**. Le pas de l'hélice devra donc être réduit à **0,37 x 51/52,3 = 0,36** m.

Si le moteur atteint bien son régime maxi, mais que la vitesse est inférieure à celle calculée, on verra s'il est possible d'augmenter le diamètre, sinon au augmentera le pas dans la proportion inverse du cas précédent. Le même calcul peut être effectué pour la vitesse de croisière choisie si c'est à celle-ci que le rendement optimum doit être atteint. Il est toujours préférable que le pas soit un peu trop faible, car on évite ainsi de fatiguer le moteur, plutôt que le contraire.

Les mesures de consommation permettront de tracer une courbe qui ne sera pas aussi régulière que celle, théorique, indiquée par le fabricant et dans laquelle les caractéristiques propres de résistance de la coque n'intervenaient pas, mais qui sera vraie et permettra de connaître la vitesse la plus économique et le rayon d'action maximum. ⚓

BIBLIOGRAPHIE - CHAPITRE 10 ••

1 • J. BAADER :
Cruceros y lanchas veloces.
Nautica Baader. Buenos Aires
(Il existe une édition italienne chez Mursia).

2 • N. WARREN :
Should we free-whell ?
Practical boat owner n°147 - mars 1979.

11

L'ARCHITECTE NAVAL

organisation de la profession et de la réglementation

A ■ LE RÔLE DE L'ARCHITECTE ❋ ❋ ❋

PENDANT fort longtemps la double fonction de concepteur et de réalisateur de navires fut confondue, et ce n'est qu'au XVIII[ème] siècle, avec le début des études théoriques de BOUGUER, EULER, DUHAMEL DU MONCEAU, CHAPMAN, et la complexité accrue des navires, que la nécessité se fit sentir d'une spécialisation de plus en plus poussée dans deux domaines distincts : la conception, de plus en plus spécifique, du navire et sa construction.

Si cette dissociation des fonctions fut irrémédiable dans le domaine de la grande construction navale, il n'en fut pas de même pour la petite construction et la plaisance. Ainsi par exemple, dans le livre de Philippe DARYL, *le Yacht*, daté de 1890, le terme d'architecte naval n'est même pas employé lorsque l'on aborde la construction et c'est avec « l'entrepreneur » que l'aspirant propriétaire passe contrat.

Il semble que ce soit la compétition, à l'origine particulièrement active dans les pays anglo-saxons, et le renom qui s'attache au bateau vainqueur qui, progressivement, ont personnalisé l'architecte naval même si celui-ci conservait conjointement la fonction de construction. C'est alors à l'architecte lui-même que s'attache le succès en course et, le vedettariat aidant, le nombre de commandes s'accroissant, il n'eut plus la possibilité de partager un temps qu'il ne pouvait plus consacrer qu'à la conception.

D'abord indépendant, bien que souvent encore attaché à un chantier, la complexité des bateaux, les problèmes liés aux jauges de courses, puis l'apparition de matériaux nouveaux, ont nécessité la création de véritables bureaux d'études capables d'appréhender la multiplicité des techniques concernées.

Dans leur *Dictionnaire de la marine à voile* de 1856, BONNEFOUX et PARIS donnent de l'architecte naval la définition suivante : *« L'architecture navale est à la fois l'art de tracer le plan de toutes sortes de navires ainsi que de leurs parties diverses, et celui d'assembler toutes ces parties et de construire ces navires. Déterminer ces plans, fixer la dimension des éléments composants, indiquer les moyens de liaison les plus solides, distribuer les emménagements, pourvoir aux nécessités variées de la navigation, de la guerre, du commerce, sont autant de questions qui ont demandé des siècles de recherches, et que, même de nos jours, on cherche à résoudre en s'appuyant plus encore sur l'expérience que sur la théorie. »*

Cette définition représente toujours le rôle essentiel de l'architecte naval. Celui-ci doit en effet avant tout concevoir une embarcation répondant aux critères d'utilisation définis et pouvant être réalisée selon les techniques de fabrication et de mise en œuvre dont dispose le constructeur.

De nos jours, cette profession peut se présenter sous des formes différentes selon que l'architecte naval sera amené à concevoir soit un bateau destiné à être réalisé à un seul exemplaire pour un client particulier, selon les désirs de celui-ci,

soit un modèle commercial destiné à une plus large diffusion selon les désirs, non plus de l'utilisateur du bateau lui-même, mais du constructeur voulant commercialiser ce modèle.

Si certains éléments de l'intervention de l'architecte sont semblables dans les deux cas, d'autres leurs sont spécifiques.

Dans les deux cas, les premiers éléments à définir seront le type et l'usage du bateau, voile ou moteur, compétition, croisière pure, côtière ou hauturière, etc., les caractéristiques dimensionnelles de base, longueur, déplacement, voilure ou puissance du ou des moteurs, nombre de passagers et emménagements correspondants, matériaux de construction, fourchette de prix.

Dans les deux cas, l'architecte devra souvent jouer déjà un rôle de conseil, on pourrait même dire de médiateur pour obtenir de son client qu'il accepte les compromis qui permettront d'aboutir à un ensemble de caractéristiques cohérentes, compatibles avec la réalisation d'une embarcation ayant des qualités nautiques convenables. C'est souvent, compte tenu de la personnalité du client (et on ne peut faire ici aucune différence entre le particulier ou le professionnel), que l'architecte naval devra faire preuve du maximum d'imagination mais aussi de diplomatie (et parfois de fermeté) pour la définition d'un avant-projet. C'est ensuite que les choses vont aller différemment selon les deux cas envisagés.

S'il a affaire à un client particulier ayant accepté l'avant-projet présenté, l'architecte naval approfondira son étude afin d'établir un projet permettant au client d'obtenir d'un chantier choisi par lui-même un devis de prix. À ce stade, l'architecte aura été amené à pousser assez loin son étude afin d'avoir une idée suffisamment précise des formes et des devis de poids qui conditionnent les caractéristiques précises du bateau. L'architecte naval pourra, bien sûr, si son client lui en fait la demande, le conseiller dans le choix du chantier en fonction de sa spécialisation dans le matériau de construction choisi, de sa situation géographique, d'une collaboration antérieure. Il le conseillera également dans l'établissement des appels d'offre et des contrats.

Il faut noter à ce sujet que ce n'est jamais l'architecte naval qui est le maître d'œuvre mais le constructeur, différence fondamentale avec l'architecte en bâtiment; le maître de l'ouvrage (le client) et le maître d'œuvre pouvant être une seule et même personne dans le cas, en particulier, d'une construction amateur.

L'accord étant réalisé entre le client et le constructeur sur les délais, les prix et la fourniture précise du bateau, l'architecte naval entreprendra alors la réalisation complète du dossier des plans nécessaires à la construction, plan des formes définitif, plans de construction généraux et de détails, d'emménagements, de voilure ou d'installation motrice, de circuits divers, sanitaires, électriques, etc.

Si l'élément conceptuel, celui qui fait le plus appel au talent, à la « patte » de l'architecte naval a été le plus important au niveau du projet, c'est maintenant que son expérience et ses connaissances techniques vont être essentielles.

Il est en effet souvent difficile pour le profane d'imaginer tous les aspects que doivent revêtir ces connaissances. Depuis les calculs fort complexes nécessités pour un voilier de compétition par une jauge de course, comme l'actuelle jauge IOR, jusqu'à la plomberie de l'installation sanitaire, la menuiserie ou l'évaluation de la consommation électrique en passant par l'hydraulique appliquée ou la résistance et la technologie des matériaux, l'architecte naval doit réunir des connaissances suffisantes dans des domaines où pour chacun l'on pourrait trouver un ingénieur spécialisé. Les connaissances générales de chacun de ses domaines devant de plus être adaptées aux conditions particulières du bateau, du milieu marin, des mouvements qui y sont liés. En effet, on ne construit pas un tiroir de bateau comme celui d'une commode d'appartement.

Pour pouvoir décider de la façon dont chaque chose devra être exécutée, il faut qu'il sache comment on peut la réaliser.

Le dossier des plans d'exécution terminé sera soumis, si nécessaire, par le constructeur (ou l'architecte lui-même s'il s'agit d'un dossier destiné à la construction amateur) à la Commission de sécurité de la navigation de plaisance pour approbation.

Tout au long de son étude, l'architecte naval aura dû tenir compte des règlements régissant la construction des embarcations de plaisance et fournir au constructeur les éléments techniques et les plans nécessaires aux formalités administratives.

Mais le rôle de l'architecte naval ne sera pas terminé. Lorsque débutera la construction, il devra fournir au constructeur les conseils et l'assistance technique nécessaires à la bonne réalisation de l'ouvrage et à assurer le respect des dispositions prévues par son étude. Cependant, ceci ne peut constituer une véritable mission de surveillance, ni dégager le constructeur de ses obligations contractuelles, ni de ses responsabilités d'étude technique complémentaire, de mise en œuvre, de surveillance et de sécurité.

La surveillance de la construction proprement dite peut être, selon convention spéciale, assurée également par l'architecte naval, mais, nécessitant une vérification pièce par pièce qui entraîne une présence presque constante sur le chantier, elle est le plus souvent assurée par des organismes spécialisés comme le Lloyd ou le Bureau Veritas. Elle ne dégage cependant en aucun cas la responsabilité du constructeur.

Dans le second cas (étude pour un constructeur destinée à une production à plusieurs exemplaires), la succession des étapes de l'intervention de l'architecte peut revêtir des aspects quelque peu différents.

Tout d'abord la collaboration entre le constructeur et l'architecte naval interviendra d'entrée de jeu et ce dernier devra connaître le plus précisément possible les méthodes et les techniques particulières du constructeur. Il doit alors avoir une très bonne expérience des méthodes industrielles, de l'organisation de la production, etc. En revanche, l'architecte naval peut être soulagé par le bureau d'études du chantier des tâches relatives à la simple exécution des plans de détails.

Si, depuis le début du projet, l'aspect esthétique du dessin n'a jamais été négligé, il prend ici un relief nouveau et devra souvent s'accompagner d'une étude de la décoration et de l'environnement intérieurs car il ne s'agit pas seulement de créer un engin capable de transporter en sécurité des personnes, mais aussi un habitat dans lequel on vivra dans des conditions d'autant plus difficiles que l'espace est forcément exigu et qui offrira un confort sécurisant contrebalançant les effets agressifs des éléments extérieurs.

Dans tous les cas, l'architecte naval doit faire preuve de grandes facultés d'adaptation aux conditions particulières de chaque constructeur, en même temps que son expérience et le rôle de conseil qui en résulte peuvent être déterminants dans le résultat de l'entreprise.

La mise à l'eau du bateau n'inscrira pas cependant le mot FIN au terme de la collaboration entre l'architecte naval et son client. Il peut en effet continuer à le conseiller pour l'entretien de son bateau ou le renouvellement de son matériel, pour toutes modifications ou travaux qu'il désirerait effectuer, expertises, etc.

B ▪ ORGANISATION DE LA PROFESSION

Nous avons vu dans l'introduction du TOME 1 qu'aucun diplôme ne consacrait la formation de l'architecte naval de plaisance. C'est là un critère de liberté séduisant, mais qui *a contrario* n'offre aucune garantie de compétence pour le client éventuel. C'est, entre autres, une des raisons qui ont conduit à la création en 1974 de l'IFAN (Institut Français des Architectes Navals).

En 1991 l'IFAN a pris le statut de syndicat professionnel afin de mieux pouvoir s'intégrer dans les structures officielles existantes et ainsi d'accroître sa représentativité vis-à-vis des pouvoirs publics. Le syndicat a pour but :

• d'établir des relations suivies entre ses membres et de resserrer leurs liens de solidarité ;

• d'établir et d'appliquer un règlement intérieur définissant les règles déontologiques et les conditions d'exercice de la profession d'architecte naval ;

• de faire reconnaître par les pouvoir publics la profession d'architecte naval comme étant celle exercée par les membres adhérents du syndicat dans le respect du règlement intérieur ;

• l'étude et la défense, notamment devant les tribunaux, des droits et des intérêts matériels et moraux, tant collectifs qu'individuels, des architectes navals ainsi qu'il est dit au **§ C** ;

• de représenter auprès des pouvoirs publics, des administrations et des groupements publics ou privés, les architectes navals ;

• de favoriser la formation et l'information de ses membres, tant sur le plan technique que juridique ou comptable ; et généralement par tous moyens légaux, l'amélioration des conditions de vie et de travail des membres adhérents.

En dehors des membres adhérents qui doivent être domiciliés et assujettis fiscalement en France, l'IFAN accueille les membres honoraires, architectes ayant cessé leur activité professionnelle et des membres sympathisants qui, par leurs connaissances ou leur activité en relation avec la profession, peuvent apporter leurs concours au Syndicat.

L'admission en son sein implique l'acceptation de certaines règles déontologiques et est essentiellement basée sur l'expérience, puisque le candidat doit justifier de cinq années d'activité professionnelle continue individuelle ou dans le cadre d'un bureau d'études, et présenter les dossiers de plusieurs unités effectivement réalisées qui seront examinés par deux parrains choisis par le candidat parmi les membres fondateurs ou titulaires depuis au moins deux ans, lesquels devront se porter garants des qualités professionnelles et morales du postulant.

L'IFAN ne représente cependant pas un « ordre » fermé tendant à monopoliser la profession au profit de quelques-uns. Il est ouvert à tous ceux qui en acceptent les règles et font la preuve de leur talent.

L'IFAN a établi des projets de contrat et une charte de l'architecte naval dont on trouvera ci-après un condensé.

Le statut juridique et fiscal de l'architecte naval est soumis au droit commun : salarié dans un bureau d'études, profession libérale ou société, toutes les situations sont possibles.

Les créations d'un architecte bénéficient de la protection des lois sur la propriété artistique, en particulier les lois du 11/3/1957, 19/7/1957, 8/7/1964 et les décrets et arrêtés y afférant. En toute hypothèse, et nonobstant le paiement de ses honoraires ou redevances, il conserve l'entière propriété intellectuelle et artistique de ses plans et dérivés ainsi que l'exclusivité de ses droits de reproduction et de représentation. Il en résulte que, dans le cas du client particulier et sauf accord spécial, l'ensemble de l'étude n'est utilisable que pour la construction d'une seule unité tandis que dans les mêmes conditions l'architecte naval se réserve le droit de faire reproduire la même unité pour un autre client ou par un autre constructeur.

LA CHARTE DE L'ARCHITECTE NAVAL

Dans les rapports entre les différents intervenants dans la réalisation d'un navire, les contrats qui les lient sont un élément déterminant de la réussite du projet. Cependant, un contrat reste limité par sa forme juridique et ne présente pas les principes généraux sur lesquels il se fonde. C'est pourquoi l'Institut Français des Architectes Navals (IFAN), le syndicat qui regroupe la grande majorité des architectes navals exerçant en France, a rédigé une Charte de l'architecte naval définissant les rapports, trop souvent méconnus dans leurs limites et leur responsabilité, entre l'architecte naval, le constructeur et l'armateur, c'est-à-dire son client.*

Cette charte insiste, dans une première partie, sur l'importance de la précision dans l'élaboration du **cahier des charges** qui définit le programme d'utilisation du navire.

A partir de ce cahier des charges, élément de base du contrat liant l'armateur à l'architecte naval, celui-ci pourra accomplir sa **mission de base** de concepteur.

Celle-ci présentera diverses étapes, depuis l'**esquisse** concrétisant une approche simplifiée et approchée des idées de l'armateur définies par le cahier des charges qui, acceptée par celui-ci, aboutira dans les délais et aux conditions prévus au contrat, au **projet final** réunissant tous les plans directeurs permettant à un chantier naval compétent de réaliser le navire.

Dans cette mission de base, l'architecte naval assure la conception générale du navire, le choix des caractéristiques déterminant ses qualités nautiques, la définition de sa structure et le style de sa silhouette et de sa décoration. Selon les cas toutes ces tâches peuvent être totalement ou partiellement réalisées par l'architecte naval, celui-ci pouvant, dans le second cas, faire appel à des intervenants extérieurs (calculs de structure par exemple).

En plus de son rôle de concepteur, il doit alors assurer celui de coordinateur des travaux de ces différents intervenants en assurant la cohérence du projet final.

Dans sa seconde partie, cette charte définit les responsabilités, les devoirs et les droits de chacun des trois partenaires : l'**architecte naval**, le **constructeur** et l'**armateur**.

Si l'architecte est responsable de la bonne marche du navire, dans les conditions prévues au cahier des charges, il ne peut garantir ses performances qui dépendent de facteurs indépendants tels que le poids réel, les performances de l'appareil propulsif, de la voilure, ou la compétence propre de l'usager.

Dans la définition globale du navire, l'architecte naval fournit, à travers le plan des formes, un déplacement, un devis de poids et une position du centre de gravité correspondant aux équipements et à la charge utile prévus au cahier des charges et au matériau de construction choisi et à la structure correspondante qu'il aura définie. Ces caractéristiques doivent être approuvées par le constructeur et l'armateur, chacun pour ses responsabilités propres.

Il définit également les formes du pont et des superstructures, la disposition générale des emménagements intérieurs et le schéma d'implantation des équipements.

En ce qui concerne les systèmes propulsifs (moteur, gréement, voilure), la responsabilité est partagée avec les fournisseurs de ces équipements qui doivent lui donner les éléments nécessaires à leur implantation (par exemple, pour la motorisation, poids, effort sur le bâti moteur, arbre et hélice) ou, pour le gréement, profil de mât et diamètre du haubanage en fonction des efforts calculés par l'architecte naval.

Par ailleurs, dans les limites de sa mission de base, l'architecte naval a le devoir d'informer le constructeur et les organismes de contrôle éventuels ainsi que l'armateur des limites de certains éléments, tels que les poids de la construction, de la charge utile et l'usage du navire.

Au cours de la construction et des visites qu'il peut effectuer (dans les limites définies au contrat), il doit fournir toutes les explications et les conseils nécessaires à la bonne réalisation du navire. Sauf mission spéciale prévue au contrat, il ne peut cependant en aucun cas être considéré comme maître d'ouvrage et ses visites n'ont aucun caractère de vérification de conformité ou de contrôle de qualité, tâches qui incombent au constructeur et éventuellement à un organisme extérieur.

L'architecte a bien sûr un devoir de confidentialité vis-à-vis du constructeur et de l'armateur, ceux-ci ayant en retour les mêmes devoirs vis-à-vis de l'architecte qui conserve la propriété artistique attachée au navire (loi du 11 mars 1957) et de toute exploitation de son œuvre ou de sa représentation qui doit comporter la citation de son nom et de sa qualité de concepteur.

Vis-à-vis de l'architecte naval et de l'armateur, le constructeur a le devoir de s'assurer qu'il est capable de réaliser le navire selon les prévisions du cahier des charges et de l'architecte dans le respect des réglementations en vigueur. Pour se faire, il a le devoir de demander à l'architecte toutes explications et informations nécessaires. Il est responsable de la qualité des matériaux, de leur mise en œuvre et de leur longévité ainsi que des équipements intégrés à la construction ou sous-traités.

Il doit assurer le contrôle de la conformité aux plans et du devis de poids, au besoin en se faisant aider par un organisme de contrôle agréé par l'architecte naval.

L'armateur, enfin, a bien sûr le droit à un navire conforme au programme défini, aux conseils de l'architecte naval et du constructeur pour l'utilisation et l'entretien de son navire. Cependant un véritable « service après-vente » nécessitant déplacements ou fourniture de plans ou documents ne peut être obtenu que contre rétribution.

En revanche, dès la prise de possession du navire, il en devient responsable et a le devoir de l'utiliser dans les conditions définies, de respecter le devis de poids en ne rajoutant pas d'équipements ou de chargements non prévus, d'assurer l'entretien correct et de limiter l'usage du navire en fonction de son altération naturelle dans le temps. Enfin, il ne peut effectuer aucune modification sans en référer à l'architecte. ■

* Ce document peut être obtenu en écrivant à l'IFAN, Butte à Guétin, 78350 Jouy-en-Josas - Fax : 01 30 70 84 22.

C ▪ RÉGLEMENTATION

1 LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

Depuis 1969, la construction des navires de plaisance est soumise à une réglementation dont la dernière version est la loi n° 83-5 81 du 5 juillet 1983, le décret n° 84-810 du 30 août 1984 modifié par les décrets n° 87-789 du 28 septembre 1987 et n° 96-859 du 26 septembre 1996, l'arrêté du 27 décembre 1984 et son règlement annexe.

Cette réglementation sur la sauvegarde de la vie humaine en mer, l'habitabilité à bord des navires et la prévention de la pollution, couvre l'ensemble de la construction navale non militaire et représente trois volumes qui sont édités au BCEOM, 15, Quai Max Hymans, 75741 Paris Cedex 15.

Cependant, une partie seulement de ces textes ne concernant que la plaisance, il sera préférable de se procurer le recueil des textes remis à jour chaque année dans le Livre de bord Bloc Marine édité par Interval Editions, 3, rue Fortia, 13001 Marseille.

Aux termes de cette réglementation, la Commission nationale de sécurité de la navigation de plaisance examine, en vue de leur approbation, les plans et documents des navires de plaisance de tonnage inférieur à **500** tx non certifiés CE, destinés à être commercialisés en France par un constructeur ou un importateur, ainsi que les plans et documents commercialisés par des architectes navals pour les constructeurs amateurs. Toutefois, ces plans et documents ne sont pas soumis à la procédure d'approbation lorsqu'ils sont établis par des amateurs pour la construction d'une unité destinée à leur propre usage. Attention ces navires ne peuvent être revendus avant un délai de 5 ans à partir de la date de leur immatriculation. Il est important, pour éviter tout retard et toute difficulté au moment de l'examen des plans par la Commission, que ceux-ci soient complets et fassent clairement apparaître tous les points visés par la réglementation.

2 LA NOUVELLE RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

Entre juin 1996 et juin 1998, une réglementation européenne va progressivement se substituer, pour les bateaux neufs entre **2,5** m et **24** m, à l'actuelle réglementation française.

Les bateaux neufs mis sur le marché européen à partir du 16 juin 1996 pourront répondre à la nouvelle réglementation européenne si le chantier le désire. Il en sera de même pour les bateaux neufs ou d'occasion importés d'un pays extérieur à la communauté. Cette réglementation deviendra obligatoire à partir de juin 1998.

Les six catégories de navigation actuelles disparaissent pour laisser place à des catégories de conception. Elles ne seront que quatre, identifiées par les lettres A, B, C, D, correspondant à une utilisation prévue pour le bateau.

La notion de distance d'un abri, actuellement en vigueur, va disparaître. Les nouvelles catégories informeront le plaisancier sur l'utilisation qu'il peut faire de son bateau. Avec la certification CE, le chantier garantit certaines possibilités du bateau, mais le plaisancier sera responsable de son utilisation. Les catégories de conception s'apparentent à une information du consommateur.

On aura :

• catégorie A, « en haute mer ». Le bateau devra pouvoir résister en toute sécurité à une mer de plus de **4** m et à un vent supérieur à force **8**.

• Catégorie B, « au large ». Le bateau devra pouvoir résister en toute sécurité à une mer atteignant **4** m et à un vent jusqu'à force **8**.

• Catégorie C, « à proximité des côtes ». Le bateau devra pouvoir résister en toute sécurité à une mer atteignant **2** m et à un vent jusqu'à force **6**.

• Catégorie D, « en eaux protégées » Le bateau devra pouvoir résister en toute sécurité à une mer atteignant **0,5** m et à un vent jusqu'à force **4**.

A ces catégories de conception correspondent les catégories suivantes d'utilisation et le matériel de sécurité prévu par la réglementation française.

• A : de la 1ère à la 6ème ;
• B : de la 2ème à la 6ème ;
• C : de la 4ème à la 6ème ;
• D : 6ème.

La conformité d'un navire aux exigences essentielles sera établie soit par le professionnel seul pour la catégorie D et la catégorie C jusqu'à 12 m de longueur lorsque les normes de flottabilité et de stabililité sont appliquées (ISO 12 217), soit avec l'intervention d'un organisme notifié, selon différentes procédures intitulées « modules » pour la catégorie C hors cas ci-dessus, ou au-dessus de 12 m et les catégories B et A.

En dehors de la norme de flottabilité et de stabilité, et peut-être à plus ou moins long terme celle des échantillonnages en cours d'étude (ISO-WO 12215), dont le respect est obligatoire, les autres normes sont indicatives et les organismes notifiés peuvent utiliser leurs propres règlements, y compris en matière d'échantillonnage. Ceci laisse les architectes et les constructeurs à l'appréciation la plus arbitraire de ces organismes ce qui, compte tenu de la concurrence entre eux, ouvre la porte à toutes les contestations et dérives possibles. Ceci, même si un organisme de consultation entre les administrations des divers états de la CEE est censé surveiller l'harmonisation de ces « règlements ».

Les organismes notifiés sont désignés par les états membres. Ce seront essentiellement des sociétés de classifications ou des structures créées spécialement comme l'ICNN mise en place par la Fédération des Industries Nautiques en France.

Ils seront concurrentiels et la décision d'un seul sera valable pour l'ensemble des états.

Il résultera de cette réglementation européenne une simplification pour les constructeurs, un surcoût à amortir sur le nombre d'unités et, pour les experts, les assureurs et les avocats, de beaux jours en perspective, compte tenu des critères sur lesquels est basée la définition des catégories de conception. ⚓

5
LA CONSTRUCTION

A LE BOIS 9
1 Construction traditionnelle 9
2 Contreplaqué et bois moulé 11
a ■ Structure et construction des coques en contreplaqué et bois moulé 12
b ■ Échantillonnages 14
3 Protection du bois 18

B LE MÉTAL 18
1 L'acier 20
a ■ Structures des coques en acier 23
b ■ Échantillonnages 23
c ■ Lest et réservoirs dans l'aileron 30
2 L'alliage léger 31
a ■ Structure des coques en alliage léger 33
b ■ Échantillonnages 33
c ■ Lest et réservoirs 34
3 Autres matériaux 35
4 Corrosion et protection des métaux 36
a ■ Corrosion chimique 36
b ■ Corrosion électrochimique 36
c ■ Aspects de la corrosion 40
d ■ La prévention de la corrosion 40
e ■ Protection contre la corrosion 41
5 Isolation thermique et acoustique 46

C LES PLASTIQUES ARMÉS 47
1 Le stratifié 47
a ■ La résine 47
b ■ Les renforts 50
c ■ Constitution du stratifié 52
■ Le cloquage des coques, problème d'osmose 54
d ■ Raidisseurs et sandwichs 57
e ■ Assemblages et collages 58
f ■ Le moulage 62
g ■ Structure et échantillonnage des coques en plastique armé 63
2 MATÉRIAUX ET TECHNIQUES À HAUTES PERFORMANCES 69
a ■ Les résines 70
b ■ Les renforts 71
c ■ Les techniques 73

6
MÂTURE, GRÉEMENT ET VOILURE

A LA MÉCANIQUE DU GRÉEMENT 77
1 Comportement d'un câble soumis à un effort transversal 77
■ Étai raide, étai mou, les effets de la prévention des haubans 79
2 Répartition des efforts dans le tissu d'une voile 80
3 Décomposition des efforts dans un foc 80
4 Décomposition des efforts dans une grand-voile 81
5 Les différents nœuds et panneaux d'un mât 82
a ■ La tête et le panneau supérieur du mât 82
b ■ Le capelage intermédiaire 83
c ■ Le panneau inférieur et le vit de mulet 84
d ■ Le pied de mât 84
e ■ Le cas des mâts souples 85

B ÉTUDE DES CONTRAINTES SUR LE MÂT ... 86
1 Choix du moment de redressement 88
2 Évaluation de la force latérale 88
3 Répartition des efforts entre les voiles 88
4 Efforts des voiles sur la mâture 90
a ■ Grand-voile 91
b ■ Bôme 91
c ■ Génois 93
d ■ Répartition de l'effort des voiles sur la mâture 95
5 Traction dans les haubans 96
a ■ Haubanage longitudinal 96
b ■ Haubanage transversal 96
6 Coefficient de sécurité 97
7 Calcul des moments d'inertie dans le mât ...99
a ■ Coefficient d'encastrement 99
b ■ Charge latérale 101
c ■ Flambage local 102

C MÉTHODE SIMPLIFIÉE 102
1 Remarques sur la méthode simplifiée 104
2 Application à l'exemple précédent 106
3 Graphique Proctor 108
4 Mât d'artimon 108
5 Calcul de la bôme 108

D MATÉRIAUX ET FORMES DES PROFILS DE MÂT 110

E ACCESSOIRES ET ÉQUIPEMENTS 113
1 Tête de mât 113
2 Fixation des haubans 114
3 Barres de flèche 115
4 Pied de mât, sorties de drisses et divers ... 117
5 Articulation de bôme 118
6 Équipements de bôme 118
7 Tangons de spinnaker 119

F LE PLAN DE GRÉEMENT 120
1 Gréement transversal 120
2 Gréement longitudinal 121
3 Les artimons 124

G LE PLAN DE VOILURE 124

7
HABITABILITÉ

A COCKPIT ET PLAN DE PONT 129
B CARRÉ 132
C CUISINE 135
D TOILETTES 137
E COIN NAVIGATION 139
F RANGEMENTS 141
G AÉRATION 142
H DÉCORATION INTÉRIEURE 143

8
ÉQUIPEMENT

A ÉLECTRICITÉ 145
1 Rappel de quelques définitions 145
2 Choix de la tension 146
3 Bilan électrique 146
4 Conservation de l'énergie 147
5 Recharge des batteries 149
a ■ Alimentation à quai et chargeurs 150
b ■ Les groupes électrogènes 150
c ■ Alternateurs de ligne d'arbre, générateurs de traînée, éoliennes et panneaux solaires 150
6 Les circuits du moteur 150
7 Les circuits généraux 151
a ■ Les schémas 151
b ■ Les câbles 153
c ■ Le tableau électrique 154
8 Le matériel 154
9 Foudre, corrosion et masse 154
a ■ Coques métalliques 156
10 Antiparasitage et interférences 156

B LE GAZ 157
1 Les bouteilles 157
2 Les canalisations 158
3 Les appareils 158

C L'EAU 159
1 Les circuits d'eau de mer 159
2 Le circuit d'eau douce 160
a ■ Réservoirs 161
b ■ La distribution 162
c ■ L'eau chaude 163
3 Épuisement, assèchement 163

D LE FROID 164

E LE CHAUFFAGE 167

F LUTTE CONTRE L'INCENDIE 167

G MOUILLAGE ET AMARRAGE 168
1 La ligne de mouillage 168
2 Les aussières 171
3 Les pare-battage 171

9
ACCASTILLAGE

A SÉCURITÉ DE L'ÉQUIPAGE 173
1 Balcons et filières 173
2 Emplacement du radeau de sauvetage 175

B AMARRAGE ET ANCRAGE 176

C MANŒUVRES 179
1 Manœuvres en provenance du mât 179
2 Écoutes de focs 179
3 Écoute de grand-voile 179

4 Les winches 180
a ■ Installation des winches 182

D APPAREILS À GOUVERNER 183
1 Appareils hydrauliques 185
2 La barre de secours 185
3 Le presse-étoupe de jaumière 185

E ACCASTILLAGES DIVERS 185
1 Réglage de pataras 185
2 Enrouleurs de foc 186
3 Panneaux de pont 186
4 Hublots 186

10
MOTORISATION

A DÉTERMINATION DE LA PUISSANCE 189

B CALCUL DE L'HÉLICE 193

C LA TRANSMISSION 197

D L'INSTALLATION MOTRICE 198
1 Montage du moteur 199
2 Compartiment moteur 200
3 Commandes du moteur 201
4 Alimentation en carburant 202
5 Circuits de refroidissement 205
6 Échappement 206
7 Ligne d'arbre 208

E ESSAIS DE MARCHE AU MOTEUR 209
1 Étude des résultats 210

11
L'ARCHITECTE NAVAL

A LE RÔLE DE L'ARCHITECTE 213

B ORGANISATION DE LA PROFESSION 215

■ LA CHARTE DE L'ARCHITECTE NAVAL ... 216

C RÉGLEMENTATION 216
1 La réglementation française 217
2 La nouvelle réglementation européenne 217

ANNEXES

FEUILLES DE CALCUL
■ PE stratifié 226
■ Hélice 227
■ Moteur 229

ANNEXES

GRÂCE aux conversions de fichiers, la disquette peut être lue sur PC, avec Excel ou Claris. Pour connaître la marche à suivre, ouvrir le document « Lisez-moi ».

Cela complique un peu la première utilisation et demande plus de mémoire, mais permet à tous de l'utiliser.

Les trois feuilles de calcul de cette annexe figurent déjà sur la disquette du TOME 2. La démarche nécessaire à leur utilisation est décrite dans les paragraphes correspondants.

1 CORRECTIONS AUX ANNEXES DU TOME 2

Dans l'introduction, pour les feuilles de calcul du sous-dossier Hydro : Section, Déplacement, Flottaison et la feuille S.P. Bordé, il faut lire : « Les formules contenues dans les colonnes suivant F sont la copie de celle-ci ».

D'autre part, pour les calculs de Surface mouillée et de Surface de dérive, il n'est pas prévu de cassure dans la courbe enveloppe de celles-ci. La copie de leurs formules se fait à partir de la colonne E.

Feuille Flottaison du sous-dossier Hydro :
Les cellules E42, F15 et F22 comportent des erreurs, il faut lire :
E42 = SI (E13 = 0; 0; E13^3*(E11/12 + D14/36
+ D15*0,046))
F15 = SI (F13 = 0; 0; F11-G11-F14)
F22 = SI (F20 = 0; 0; F12-G12-F21)
Les résultats de l'exemple deviennent :
Cellules
B42 = 38,05
E42 = 11,44
F3 = 1054
F4 = 52,71
D'autre part, sur la figure les z sont à remplacer par y.
Les cellules G15, G22 et les suivantes sur la ligne sont les transpositions de F15 et F22.

Feuille S.P. Bordé :
Les cellules F16 et F22 doivent être modifiées ainsi :
F16 = F10*0,68*SI (E10 = 0; F12; E12)*F13
F22 = F10*0,68*SI (E10 = 0; F19; E19)*F13
Les résultats de l'exemple deviennent :
Cellules
B23 = 22,68 Surf. bordé : 47,01
B17 = 306,19 Poids : 635
B27 = 5,92 Gx : 4,67
Les cellules G16, G22 et les suivantes sur la ligne sont les transpositions de F16 et F22.

▪PE STRATIFIÉ .....
Formules 226
Exemple 226
▪HÉLICE.....
Formules 227
Exemple 228
▪MOTEUR.....
Formules 229

FEUILLES DE CALCUL

PE STRATIFIÉ

Formules • PE stratifié

	A	B	C	D	E	F
1	Réf. navire:		Date:		Zone:	
2						
3	Type de résine:		d:			
4	Type de charge:		d:		% dans résine:	
5						
6	Poids tot. de mat g/m2:		d:		Prop. résine/1:	
7	Poids tot. de tissus g/m2:		d:		Prop. résine/1:	
8	Poids tot. de verre g/m2:	=SOMME(B6..B7)				
9	Poids de résine/mat g/m2:	=B6*F6				
10	Poids de résine/tissus g/m2:	=B7*F7				
11	Poids tot. de résine g/m2:	=B9+B10				
12	Poids de charge g/m2:	=B11*F4%				
13	Poids tot. du stratifié g/m2:	=B10+B11+B12				
14	Epaisseur verre mm:	=(B6/D6+B7/D7)/1000				
15	Epaisseur résine mm:	=B11/D3/1000				
16	Epaisseur charge mm:	=B12/D4/1000				
17	Epaisseur totale mm:	=B14+B15+B16				

Exemple • PE stratifié

	A	B	C	D	E	F
1	Réf. navire:	ARCHI II	Date:	4.12.95	Zone:	II
2						
3	Type de résine:	polyester	d:	1,20		
4	Type de charge:	X	d:	2,50	% dans résine:	20
5						
6	Poids tot. de mat g/m2:	600	d:	2,54	Prop. résine/1:	3,0
7	Poids tot. de tissus g/m2:	1200	d:	2,54	Prop. résine/1:	1,5
8	Poids tot. de verre g/m2:	1800				
9	Poids de résine/mat g/m2:	1800				
10	Poids de résine/tissus g/m2:	1800				
11	Poids tot. de résine g/m2:	3600				
12	Poids de charge g/m2:	720				
13	Poids tot. du stratifié g/m2:	6120				
14	Epaisseur verre mm:	0,71				
15	Epaisseur résine mm:	3,00				
16	Epaisseur charge mm:	0,29				
17	Epaisseur totale mm:	4,00				

	A	B	C	D	E	F
1	Réf. navire:			Date:		
2						
3	Cor. couche lim. Cl %:		n2 %:		n3 %:	
4						
5		Régime croisière		Régime maxi		
6	Degré de vitesse:					
7	Vitesse nœuds:					
8	Vit. couche lim. Vl n:	=B7-B7*B3%		=D7-D7*B3%		
9	Rég. mot. Nm t/mn:					
10	Puiss. mot. Pm kW:					
11	Puiss. aux. Paux kW:					
12	Puiss./arb. Pa kW:	=((B10*F3/100)-B11)*D3/100		=((D10*F3/100)-D11)*D3/100		
13	Cc estimé:			=B13		
14	N/arbre cal. Na t/mn:	=B13*9,76*B8^2,5/RACINE(B12)		=D13*9,76*D8^2,5/RACINE(D12)		
15	Rap. réducteur/1:			=B15		
16	N/arbre Na t/mn:	=B9/B15		=D9/D15		
17	Cc calculé:	=RACINE(B12)*B16/9,76/B8^2,5		=RACINE(D12)*D16/9,76/D8^2,5		
18	Rendement %:					
19	Cœfficient diam. ∂:					
20	Rapport de pas:					
21	D calculé m & p:	=30,8*B8/B19/B16	=B21/0,0254	=30,8*D8/D19/D16	=D21/0,0254	
22	Pas calculé m & p:	=B21*B20	=B22/0,0254	=D21*D20	=D22/0,0254	
23	D installé m & p:	=C23*0,0254		=B23	=C23	
24	Correction pas %:					
25	Pas cor. m & p:	=B22*(100+B24)/100	=B25/0,0254	=D22*(100+D24)/100	=D25/0,0254	
26	Perte rendement %:					
27	Rendement cor. %:	=B18-B26		=D18-D26		
28	Vitesse nœuds:	=B7*(100-B26^(1/2,5))/100		=D7*(100-D26^(1/2,5))/100		
29	Sp/Sd mini:	=B12*25/(PI()*(B23*100)^2/4)		=D12*25/(PI()*(D23*100)^2/4)		

Exemple • Hélice

	A	B	C	D	E	F
1	Réf. navire:	ARCHI II		Date:	19.01.96	
2						
3	Cor. couche lim. Cl %:	20	n2 %:	94	n3 %:	85
4						
5		Régime croisière		Régime maxi		
6	Degré de vitesse:	2,2		2,4		
7	Vitesse nœuds:	6,6		7,2		
8	Vit. couche lim. Vl n:	5,3		5,8		
9	Rég. mot. Nm t/mn:	2550		3300		
10	Puiss. mot. Pm kW:	14,4		31		
11	Puiss. aux. Paux kW:					
12	Puiss./arb. Pa kW:	11,5		24,8		
13	Cc estimé:	5		5		
14	N/arbre cal. Na t/mn:	922		781		
15	Rap. réducteur/1:	2,7		2,7		
16	N/arbre Na t/mn:	944		1222		
17	Cc calculé:	5,12		7,83		
18	Rendement %:	47,7		42,5		
19	Cœfficient diam. ∂:	0,34		0,31		
20	Rapport de pas:	0,62		0,61		
21	D calculé m & p:	0,51	19,93	0,48	18,73	
22	Pas calculé m & p:	0,31	12,36	0,29	11,33	
23	D installé m & p:	0,43	17	0,43	17	
24	Correction pas %:	20		12,5		
25	Pas cor. m & p:	0,38	14,83	0,32	12,75	
26	Perte rendement %:	6		2,5		
27	Rendement cor. %:	41,7		40		
28	Vitesse nœuds:	6,5		7,1		
29	Sp/Sd mini:	0,20		0,42		

FEUILLES DE CALCUL MOTEUR

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Réf. navire:			Date:						
2										
3	L.fl. m:		Δ m3:			Δ/(Lf/100)^3:	=D3/(B3/100)^3		Cap. réservoir l:	
4	Moteur:			Carburant:			Dens. carburant:		Con.l/m:	
5	Rend. hél. n1 %:			Rend. tran. n2 %:			Rend. mot. n3 %:		Aut. m:	=J3/J4*0,85
6										
7	Deg. vit. n,m:	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
8	V nœuds:	=B7*RACINE(B3)								
9	Rés./t daN:									
10	Rés. tot. daN:	=B9*D3*1,02								
11	P hélice Ph kW:	=B10*B8*0,005								
12	P arbre Pa kW:	=B11*100/B5								
13	P sortie Ps kW:	=B12*100/E5								
14	P aux. kW:									
15	P moteur Pm kW:	=(B13+B14)*100/H5								
16	Régime N t/mn:									
17	Consom. g/kW/h:									
18	Consom. l/h:	=B17*B15/H4/1000								
19	Consom. l/mille:	=B18/B8								